

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 9 т.

Т. 4

Международная научная конференция

**«ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ И ФОТОГРАММЕТРИЯ, МОНИТОРИНГ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ГЕОЭКОЛОГИЯ»**

Новосибирск
СГУГиТ
2026

Ответственные за выпуск:

Доктор физико-математических наук, зав. лабораторией
математического моделирования процессов в атмосфере
и гидросфере ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск
Г. А. Платов

Доктор технических наук, зав. кафедрой фотограмметрии
и дистанционного зондирования СГУГиТ, г. Новосибирск
А. В. Комиссаров

- С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXII Международный научный конгресс, 18–22 мая 2026 г., Новосибирск : сборник материалов в 9 т. Т. 4: Международная научная конференция «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2026. – 293 с. – ISSN 2618-981X. – Текст : непосредственный.

DOI 10.33764/2618-981X-2026-4

В сборнике опубликованы материалы XXII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

Издание может содержать сведения об иностранных агентах

А. В. Андриященко^{1✉}, Д. А. Гура^{1,2}

Сравнительный анализ нейросетевых архитектур для задач топографического дешифрирования

¹Кубанский государственный технологический университет,
г. Краснодар, Российская Федерация

²Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Российская Федерация
e-mail: antonandr72@gmail.com

Аннотация. В работе представлен сравнительный анализ архитектур искусственных нейронных сетей для задач автоматического топографического дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли. Проблема классической ручной оцифровки заключается в высоких временных затратах и неизбежном влиянии человеческого фактора. Цель работы - определение наиболее перспективной модели для автоматизации данного процесса. Рассматриваются три популярные архитектуры: YOLOv8, Mask R-CNN и Segment Anything Model. Сравнение проводится по ключевым критериям: точность выделения границ, скорость обработки, потребность в обучающих данных и требования к аппаратному обеспечению. Установлено, что Segment Anything Model отличается высокой точностью, но требует серьезных вычислительных мощностей и не понимает семантику в автоматическом режиме. Mask R-CNN генерирует качественные контуры, однако существенно уступает конкурентам в скорости. В результате исследования сделан вывод, что оптимальной моделью для поставленных задач является YOLOv8. Данная нейросеть демонстрирует отличные показатели скорости инференса и имеет приоритет для проведения дальнейших эмпирических исследований.

Ключевые слова: топографическое дешифрирование, нейронные сети, YOLOv8, SAM, Mask R-CNN, геоинформационные системы, автоматизация, метрики оценки

A. V. Andryushchenko^{1✉}, D. A. Gura^{1,2}

Comparative analysis of neural network architectures for topographic interpretation tasks

¹Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

²Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation
e-mail: antonandr72@gmail.com

Abstract. This article presents a comparative analysis of artificial neural network architectures for the tasks of automatic topographic interpretation of Earth remote sensing data. The problem of classical manual digitization lies in high time consumption and the inevitable influence of the human factor. The aim of the study is to determine the most promising model for automating this process. Three popular architectures are considered: YOLOv8, Mask R-CNN, and Segment Anything Model. The comparison is conducted based on key criteria: boundary extraction accuracy, processing speed, training data requirements, and hardware requirements. It is established that Segment Anything Model is characterized by high accuracy but requires significant computing power and lacks semantic understanding in automatic mode. Mask R-CNN generates high-quality contours, but lags significantly behind competitors in speed. As a result of the study, it is concluded that YOLOv8 is the optimal model for the tasks at hand. This neural network demonstrates excellent inference speed and is prioritized for further empirical testing.

Keywords: topographic interpretation, neural networks, YOLOv8, SAM, Mask R-CNN, geographic information systems, automation, and evaluation metrics

Введение

Современные технологии дистанционного зондирования Земли (далее – ДЗЗ) производят большой объем геопространственных данных. Классическая ручная оцифровка данных ДЗЗ требует значительных временных и трудовых затрат. Такая оцифровка предполагает выделение контуров объектов вручную, что неизбежно приводит к ошибкам, ввиду чрезмерного влияния человеческого фактора [1].

Проблему низкой производительности труда и излишнего влияния человеческого фактора возможно решить за счет внедрения в производственный процесс алгоритмов автоматической оцифровки на основе нейронных сетей. При успешном внедрении специалист выполняет функции экспертного контроля, избегая рутинных процессов [2–5].

На данном этапе целью является определение наиболее перспективного вектора исследования, а именно наиболее перспективной модели искусственной нейронной сети для задач автоматической векторизации данных ДЗЗ.

Методы и материалы

В работе рассматриваются три архитектуры: YOLOv8 (YOLOv8-seg), Mask R-CNN и Segment Anything Model (далее – SAM). Выбор обусловлен их пригодностью для обработки данных ДЗЗ.

YOLOv8 – это одностадийная архитектура, которая изначально создавалась с упором на скорость работы в реальном времени. Данная модель показывает высокие результаты по скорости инференса. YOLOv8 способна быстрее конкурентов справляться с сегментацией больших объемов данных. Однако, из-за архитектурных особенностей модель имеет тенденцию к «сглаживанию» углов сложных многоугольников.

Mask R-CNN – это классическая двухстадийная модель для сегментации. Данная модель сначала ищет регионы с потенциальными объектами, а затем генерирует для них маски. Mask R-CNN выдает более качественные и точные контуры по сравнению с YOLOv8, а также отлично справляется с плотной застройкой и наложением объектов друг на друга. Однако, скорость обработки растров заметно ниже конкурентов. Архитектура сложнее в настройке гиперпараметров и более чувствительна к качеству и сбалансированности обучающей выборки, в отличие от аналогов.

SAM – это модель, предварительно обученная на значительном объеме данных. Данная модель обладает высокой точностью выделения контуров. Способна выделять объекты без предварительного дообучения. Однако, в режиме полностью автоматической генерации масок модель не понимает семантику. SAM выделяет на ортофотоплане все видимые объекты без понимания необходимости их выделения (например, автомобили). Для корректной работы в автоматическом режиме SAM возможно комбинировать с другими моделями. Например, используя быструю модель YOLOv8 определить ограничивающую рамку

здания, затем используя модель SAM внутри этой рамки сформировать маску. Также стоит отметить, что SAM, в отличие от других моделей требует больших вычислительных мощностей.

Результаты и обсуждение

Для объективной оценки архитектур YOLOv8, Mask R-CNN и SAM на предмет автоматической оцифровки данных ДЗЗ необходимо определить критерии их оценки.

Поскольку предполагается, что автоматическая оцифровка данных ДЗЗ может использоваться в кадастре, то критичным параметром является точность выделения границ. Это обусловлено тем, что значительная погрешность в определении границ может привести к земельным спорам между собственниками земельных участков и т. п. [2, 6].

Также предполагается, что основными данными ДЗЗ, которые подлежат оцифровке являются ортофотопланы, которые являются массивными растрами с высоким пространственным разрешением. Исходя из этого, выделяется скорость обработки, как один из критериев оценки моделей нейронной сети. Способность модели быстро обрабатывать большие данные является основой экономической эффективности предлагаемых методов автоматической оцифровки [7].

Для корректной работы большинства моделей на конкретной местности необходим набор данных (датасет). Исходя из этого формируется еще один критерий – потребность в данных. Он определяется объемом датасета, необходимого для того, чтобы модель начала уверенно распознавать специфические объекты. Например, сложные конфигурации крыш, заборы, грунтовые дороги и т. п. [8].

Не менее важный критерий – это требование к аппаратному обеспечению. Под этим критерием понимается объем видеопамати и вычислительная мощность графического процессора, необходимые для обучения и применения модели искусственной нейронной сети.

После проведения анализа критериев применительно к каждой рассматриваемой модели искусственной нейронной сети была сформирована таблица соответствия критериев и моделей искусственной нейронной сети (табл. 1). Соответствие критериям определялось в соответствии со шкалой оценки: «Очень низко» – «Низко» – «Средне» – «Высоко» – «Очень высоко».

Таблица 1. Сравнительный анализ архитектур искусственной нейронной сети

Критерий	YOLOv8	Mask R-CNN	SAM
Точность границ	Средняя	Высокая	Очень высокая
Скорость работы	Очень высокая	Средняя	Низкая
Потребность в данных	Высокая	Высокая	Очень низкая
Требования к аппаратуре	Низкие	Средние	Высокие

Исходя из данных в таблице 1, можно сделать вывод о том, что наилучшей моделью искусственной нейронной сети для задачи автоматического дешифрирования данных ДЗЗ является YOLOv8. Данная модель имеет приоритет для дальнейших эмпирических тестов и будет протестирована в первую очередь во время будущих исследований.

Заключение

В ходе проведенного исследования был выполнен сравнительный анализ архитектур YOLOv8, Mask R-CNN и SAM. Целью работы являлось определение наиболее перспективной модели искусственной нейронной сети для задач автоматической векторизации данных ДЗЗ.

Оценка нейросетевых моделей проводилась на основе комплекса критериев, включая точность выделения границ, скорость обработки, потребность в обучающих данных и требования к аппаратному обеспечению.

Модель SAM обладает высокой точностью выделения контуров. Однако, в режиме автоматической генерации масок она не понимает семантику и выделяет все видимые объекты. Также данная архитектура требует больших вычислительных мощностей в отличие от других моделей.

Двухстадийная архитектура Mask R-CNN выдает более качественные и точные контуры по сравнению с YOLOv8 и отлично справляется с плотной застройкой. При этом скорость обработки растров у нее заметно ниже конкурентов, а сама модель сложнее в настройке гиперпараметров и чувствительнее к обучающей выборке.

Одностадийная архитектура YOLOv8 демонстрирует высокие результаты по скорости инференса. Данная модель способна быстрее конкурентов выполнять сегментацию больших объемов данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тематическое дешифрирование аэроснимков лесных территорий на основе концептуального моделирования / К. В. Шошина, Р. А. Алешко, В. В. Березовский [и др.] // Онтология проектирования. – 2023. – Т. 13, № 3(49). – С. 437–454.
2. К вопросу о применении нейросетевого алгоритма для мониторинга состояния городской среды / Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, Д. А. Беспятчук [и др.] // Экологические системы и приборы. – 2023. – № 8. – С. 42–50. – DOI 10.25791/esip.8.2023.1392. – EDN KСЕСРТ.
3. Разработка алгоритма семантической сегментации аэрофотоснимков реального времени / Ю. Б. Блохинов, В. А. Горбачев, Ю. О. Ракутин, А. Д. Никитин // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 141–148.
4. Семантическая сегментация данных дистанционного зондирования Земли при помощи нейросетевых алгоритмов / А. А. Друки, В. Г. Спицын, Ю. А. Болотова, А. А. Башлыков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 1. – С. 59–68.
5. Семантическая сегментация спутниковых снимков аэропортов с помощью свёрточных нейронных сетей / В. А. Горбачев, И. А. Криворотов, А. О. Маркелов, Е. В. Котлярова // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 4. – С. 636–645.
6. Береговой, Д. В. Методика автоматизированного создания топографического плана на основе съёмки с беспилотного летательного аппарата / Д. В. Береговой, М. Г. Мустафин // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79, № 9. – С. 30–36.

7. Алгоритмы семантической сегментации разновременных многоспектральных изображений с использованием глубокого обучения / Ю. Ю. Громов, Ю. Г. Веселов, И. Н. Ищук, В. В. Родионов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2025. – № 2. – С. 1–16. – DOI 10.25791/pribor.2.2025.1555.

8. Дьяченко, Р. А. К вопросу об увеличении производительности машинного обучения на этапе выборки данных при решении задач классификации / Р. А. Дьяченко, П. А. Косолапов, Д. А. Гура // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2022. – № 4. – С. 146–155. – DOI 10.17308/sait/1995-5499/2022/4/146-155.

© А. В. Андриященко, Д. А. Гура, 2026

Ф. Р. Валишев¹✉, С. С. Шемяков¹, А. А. Ерофеев¹

Спутниковое геодезическое обеспечение цифрового двойника объекта дорожной инфраструктуры в криолитозоне

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ),
г. Томск, Российская Федерация
e-mail: fuat_1981@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме геодезического обеспечения цифровых двойников линейных инфраструктурных объектов, эксплуатируемых в криолитозоне. На примере участка, расположенного на 1 242 км автодороги Сургут-Надым-Салехард (Ямало-Ненецкий автономный округ) с мостом через реку Хойзерияна апробирована комплексная методика создания планово-высотной геодезической основы с применением спутниковой геодезической аппаратуры, метода точного позиционирования PPP и сервиса постобработки AUSPOS. Описана архитектура цифрового двойника участка автодороги, объединяющего материалы воздушного лазерного сканирования, цифровые модели рельефа и теплофизическую модель грунтов. Показано, как высокоточное планово-высотное геодезическое обоснование обеспечивает интеграцию разнородных пространственных данных с прогнозной моделью деградации многолетнемерзлых пород. Обоснована ключевая роль спутниковой геодезии в создании динамических пространственно-временных моделей для исследования интенсивности деформации объектов транспортной инфраструктурой в криолитозоне.

Ключевые слова: спутниковая геодезия, ГНСС, цифровой двойник, криолитозона, автодорога, воздушное лазерное сканирование, теплофизическое моделирование

F. R. Valishev¹✉, S. S. Shemykov¹, A. A. Erofeev¹

Satellite geodetic support for a digital twin of a road Infrastructure facility in the cryolithozone

¹National Research Tomsk State University (NR TSU), Tomsk, Russian Federation
e-mail: fuat_1981@mail.ru

Abstract. The article addresses the problem of geodetic support for digital twins of linear infrastructure facilities operated in the cryolithozone. Using the example of a section located at 1,242 km of the Surgut–Nadym–Salekhard highway (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug) with a bridge over the Khoyzeriyena River, a comprehensive methodology for establishing a horizontal and vertical geodetic control network has been tested, employing satellite geodetic equipment, the Precise Point Positioning (PPP) method, and the AUSPOS post-processing service. The architecture of a digital twin of the highway section is described, integrating airborne laser scanning data, digital elevation models, and a thermophysical soil model. It is shown how high-precision horizontal and vertical geodetic control enables the fusion of heterogeneous spatial data with a predictive model of permafrost degradation. The key role of satellite geodesy in creating dynamic spatiotemporal models for studying the deformation intensity of transport infrastructure facilities in the cryolithozone is substantiated

Keywords: satellite geodesy, GNSS, digital twin, cryolithozone, highway, airborne laser scanning, thermophysical modeling

Введение

Линейные объекты транспортной инфраструктуры, расположенные в криолитозоне, испытывают непрерывное воздействие криогенных процессов – термокарста, морозного пучения, солифлюкции, термоэрозии и др. [1]. Автомобильная дорога Надым-Салехард, пересекающая Ямало-Ненецкий автономный округ на протяжении 344 км, является важнейшей круглогодичной транспортной артерией, связывающей западные и восточные районы округа. Ежегодные наблюдения фиксируют локальные деформации дорожного покрытия – просадки, трещины, волны, обусловленные деградацией многолетнемерзлых оснований под воздействием климатических изменений и техногенных нагрузок. Прогнозирование этих процессов и научное обоснование инженерных решений требуют перехода от разрозненных периодических обследований к постоянному мониторингу, основанному на цифровых двойниках и современных информационных системах. Данный подход позволит применять динамические пространственно-временные модели, интегрирующие данные геодезического мониторинга, дистанционного зондирования Земли и численного теплофизического моделирования.

Концепция цифрового двойника (ЦД) в приложении к инженерным объектам предполагает наличие виртуального аналога, который синхронизируется с физическим оригиналом в режиме, близком к реальному времени, и позволяет не только диагностировать текущее состояние, но и моделировать сценарии его изменения под действием природных и техногенных факторов. Для линейных сооружений в криолитозоне такой двойник должен объединять: геометрически точную модель рельефа и конструктивных элементов дороги; геологическую модель основания с распределением льдистости и теплофизических свойств; данные многолетнего геодезического мониторинга смещений; климатические и гидрогеологические параметры; а также численный решатель, воспроизводящий тепловые и деформационные процессы. Ядром, обеспечивающим совместную работу всех компонентов, служит единая высокоточная пространственно-временная основа, создаваемая средствами спутниковой геодезии.

Ключевым требованием к геодезическому обеспечению ЦД является возможность фиксации смещений с сантиметровой точностью в условиях практически полного отсутствия постоянно действующих базовых станций на удаленных арктических территориях. В рамках проекта, поддержанного грантом Губернатора Ямало-Ненецкого автономного округа (проект № 601-19-01/13), разработана и апробирована методика спутниково-геодезического мониторинга, опирающаяся на метод точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning) и свободно распространяемые сервисы постобработки ГНСС-данных.

Методы и материалы

Спутниково-геодезические наблюдения и их обработка. Полевые работы в рамках данного исследования выполнялись в летний период в 2024 и 2025 гг. Для создания планово-высотной геодезической сети на 23 ключевых участках авто-

дороги Сургут-Надым-Салехард, расположенных в интервале с 997 до 1 279 км, были закреплены долговременные реперы. Конструктивно реперы представляли собой анкерные болты, засверленные в бетонные блоки дорожного ограждения и болты, засверленные непосредственно в асфальтобетонное покрытие обочины. Все знаки замаркированы, сфотографированы и снабжены описанием местоположения для последующей идентификации при повторных циклах измерений.

Спутниковые геодезические наблюдения выполнялись в статическом режиме двухчастотными ГНСС-приемниками Pentax G6Ti (220 каналов, встроенные модемы, степень защиты IP68) и EFT M1 Plus. Продолжительность сеансов варьировалась от 3 до 9 часов, дискретность записи составляла 1 Гц, маска угла возвышения спутников – 5° . Ориентация антенн выверялась по северу с точностью не хуже 2° , а высота антенны измерялась дважды – до и после сеанса – с контролем сходимости.

Обработка наблюдений выполнена методом PPP с помощью онлайн-сервиса AUSPOS, поддерживаемого геонаучным центром Австралии (Geoscience Australia) [2]. Сервис использует точные эфемериды и поправки часов, предоставляемые Международной ГНСС-службой (IGS), и программное ядро Bernese GNSS Software Version 5.2, что обеспечивает определение координат в системе ITRF2020 на эпоху наблюдений с заявленной точностью около 1–3 см в плане и до 1 см по высоте при длительности сеанса свыше 6 часов. В расчетах учитывались параметры антенн (ARP – точка приведения антенны, APC – фазовый центр) согласно калибровочным файлам IGS, а также глобальная модель геоида EGM2008. Среднее удаление реперов от ближайших постоянно действующих пунктов IGS, используемых AUSPOS в качестве опорных, не превышало 800 км, что соответствует рекомендациям для PPP-обработки [3].

Воздушное лазерное сканирование и построение цифровых моделей рельефа. Параллельно с геодезическими наземными работами выполнена аэрофототопосъемка с использованием беспилотного воздушного судна вертолетного типа ВТ-30Е, оснащенного лазерным сканером АГМ-МС3 v.2. Было отснято 26 участков автодороги общей протяженностью 233 км. Полеты проводились на относительной высоте 100 м при скорости вдоль автодороги до 8 м/с и на удалении 12–15 м/с. Суммарная плотность неклассифицированного облака точек лазерных отражений составила 60–70 точек/м², после выделения класса «земля» – 5–7 точек/м², что обеспечивает детальность описания микрорельефа, достаточную для выявления локальных деформаций в виде просадок.

Обработка данных ВЛС включала уравнивание траекторий, поиск и уравнивание соответствий между перекрывающимися полосами в программном пакете AGM ScanWorks Pro, классификацию точек по типам поверхности LiDAR 360 [13], а также фотограмметрическую обработку аэрофотоснимков в Agisoft Metashape для получения ортофотопланов и цифровых моделей поверхности. По облаку точек класса «земля» построены цифровые модели рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 2–4 см. Ортофотопланы имеют разрешение 2 см/пиксель. Точность координирования облаков точек контролировалась по геодезическим реперам: средняя ошибка по координатам центров фотографирования не превысила 1,4 мм

по X , 0,2 мм по Y и 0,6 мм по Z , что говорит о высокой жесткости уравненной фотограмметрической сети.

Концепция и архитектура цифрового двойника. Разрабатываемый цифровой двойник участка автодороги (мост через реку Хойзериена) в криолитозоне представляет собой многослойную информационно-вычислительную систему, объединяющую следующие функциональные подсистемы.

1. Подсистема сбора и хранения данных, аккумулирующая результаты периодических ГНСС-измерений на реперах, данные непрерывного мониторинга с автоматических метеостанций и термометрических скважин, материалы ВЛС, а также атрибутивную информацию о конструкции дорожной одежды и геологическом строении основания.

2. Пространственно-временная основа, реализованная в виде каталога координат реперов и опорных точек в единой системе ITRF2020 с привязкой к эпохам наблюдений и оценками точности [4]. Именно эта подсистема обеспечивает совместное использование разновременных и разнородных данных в общей системе отсчета.

3. Геометрическая модель рельефа территории в виде облака точек лазерных отражений, построенная по данным ВЛС, а также трехмерных моделей инженерных сооружений (мосты, водопропускные трубы), построенных по данным лазерного сканирования комбинированным способом.

4. Теплофизическая модель в программном комплексе Frost 3D, которая на основе распределения теплофизических свойств грунтов и граничных климатических условий рассчитывает температурное поле грунтов основания и прогнозирует его динамику.

5. Подсистема анализа деформаций, сопоставляет координаты реперов, полученные в разных циклах наблюдений с применением СГА, с расчетными полями напряжений и деформаций. Это позволяет выявлять зоны риска и тренды смещений.

Все компоненты объединены в ГИС-проекте в программном комплексе QGIS, где ключевым связующим элементом выступает высокоточная геодезическая основа. Без нее невозможно корректно совместить облака точек, полученные в разные годы и организовать мониторинг динамики деформаций.

Результаты

Пространственно-временная основа цифрового двойника. В результате обработки ГНСС-наблюдений получены координаты 23 реперов. Для каждого пункта сервис AUSPOS выдает полную ковариационную матрицу, что позволяет корректно оценивать точность и использовать ее при последующем уравнивании сети.

Средняя квадратическая погрешность (СКП) определения плановых координат по всей сети составила 8 мм, высотных – 20 мм, что соответствует требованиям ГОСТ Р 59562–2021 к топографическим съемкам масштаба 1:500 и обеспечивает надежную основу для мониторинга деформаций [3]. Полученная

точность характерна для PPP-обработки при длительности сеансов более 3 часов и удалении от пунктов IGS в пределах 1 000 км.

Важно отметить, что все 23 репера были объединены в единую сеть путем совместного уравнивания векторов, полученных по PPP, с фиксацией одного наиболее надежного пункта. Это позволило дополнительно повысить внутреннюю согласованность сети: относительные ошибки между соседними реперами не превысили 5 мм в плане и 12 мм по высоте.

Интеграция с ВЛС, построение ЦМР и теплофизическое моделирование участка автодороги Надым-Салехард с мостом через реку Хойзериена. Цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная по данным воздушного лазерного сканирования (ВЛС), является геометрической основой для создания теплофизической модели участка автодороги Надым-Салехард с мостом через реку Хойзериена.

На основе классифицированных облаков точек (класс «земля») после уравнивания по геодезическим реперам была построена ЦМР с регулярным шагом 0,5 м. (рисунок 1). Пространственное разрешение итоговых ЦМР составило 2–4 см, отклонения от контрольных точек на реперах не превысили 3 см.

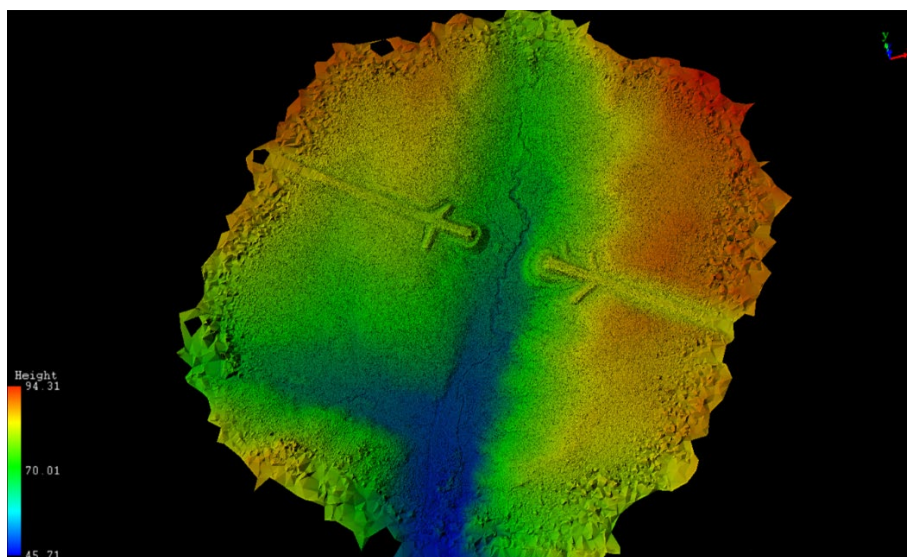


Рис. 1. Цифровая модель рельефа участка исследований с регулярным шагом 0,5 м

Полученная ЦМР импортирована в программный комплекс Frost 3D для построения трехмерной теплофизической модели.

Решалась нестационарная задача распространения тепла в трехмерном пространстве в программе Frost.Termo, основанная на широком апробированном уравнении теплопроводности (1), в котором учтены фазовые превращения и перенос тепла за счет конвекции [5]:

$$\left(C(T) + p_d L \frac{\partial W_w(T)}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda(T) \nabla T) + C_w u \nabla T = 0, \quad (1)$$

где T – температура, °C; $C(T)$ – объемная теплоемкость грунта, Дж/(м³·°C); $w_w(T)$ – содержание незамерзшей воды, д.е.; ρ_d – плотность скелета грунта, кг/м³; L – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; $\lambda(T)$ – теплопроводность, Вт/(м·°C); C_w – объемная теплоемкость воды, Дж/(м³·°C); u – вектор скорости фильтрации, м/с.

Для выполнения корректного моделирования требуется комплекс исходной информации: 1) геометрия модели и геологическое строение: задаются размеры расчетной области и пространственное распределение инженерно-геологических элементов (ИГЭ) [6] через сетку виртуальных скважин или поверхностей, 2) теплофизические свойства грунтов: для каждого ИГЭ необходимо задать параметры, определяющие его поведение при промерзании-оттаивании: плотность скелета грунта, ρ_d , г/см³, суммарная влажность, W_{tot} , д. е., теплопроводность в талом (λ_{th}) и мерзлом (λ_f) состояниях, Вт/(м·°C), объемная теплоемкость в талом (C_{th}) и мерзлом (C_f) состояниях, Дж/(м³·°C), параметры для построения кривой незамерзшей воды (температура начала замерзания T_{bf} , влажность на границе раскатывания W_p , число пластичности I_p), 3) климатические воздействия: на верхнюю границу модели задаются граничные условия, отражающие теплообмен с атмосферой: – многолетний ход температуры воздуха (среднемесячные или суточные значения). – высота и плотность снежного покрова по месяцам, – скорость ветра для расчета коэффициента конвективного теплообмена, – возможен учет долгосрочного климатического тренда (например, линейное повышение среднегодовой температуры), 4) начальное температурное поле: распределение температуры в грунтовом массиве на начальный момент времени. Задается по данным термометрических скважин или как результат предварительного стационарного расчета, 5) граничные условия на боковых и нижней границах: как правило, задаются условия адиабатичности (нулевой тепловой поток) или постоянного геотермического градиента, 6) параметры сооружений и инженерных мероприятий: при необходимости в модель включаются фундаменты, теплоизоляционные экраны, сезоннодействующие охлаждающие устройства (термосифоны), трубопроводы с заданными теплофизическими свойствами материалов.

На рисунке 2.а и 2.б представлены результаты моделирования. На 15 октября 2024 г. – четко видно распространение многолетней мерзлоты (голубые тона).

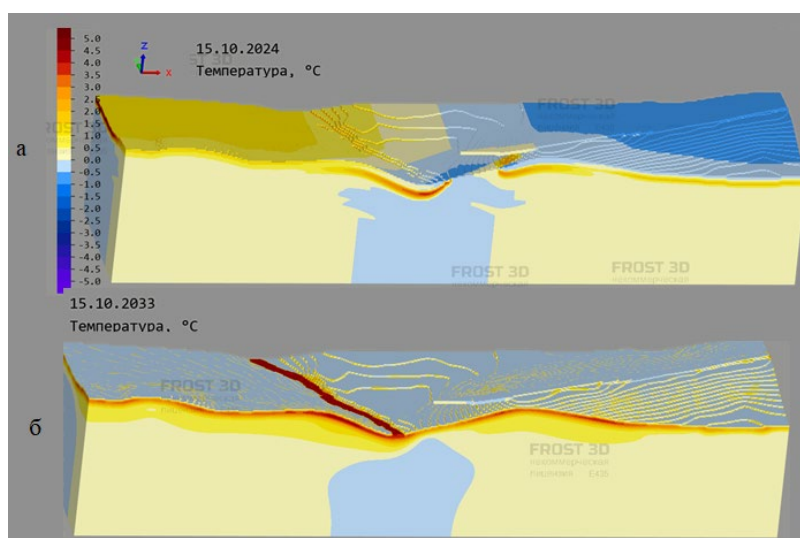


Рис. 2. Распределение потока тепла на середину октября 2024 г. (а) и прогноз температурных условий на изучаемом участке в октябре 2033 г (б)

Прогнозное моделирование до 2033 г. с учетом тренда повышения среднегодовой температуры воздуха ($+0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$) показало постепенную деградацию островной мерзлоты: к 2033 г. кровля мерзлоты опускается, а талик под руслом реки расширяется (рис.2.б). На рис. 3 приведены температурные профили в скважине у опоры моста на 2024 и 2033 гг., полученные в результате расчета на геометрической основе, заданной ЦМР.

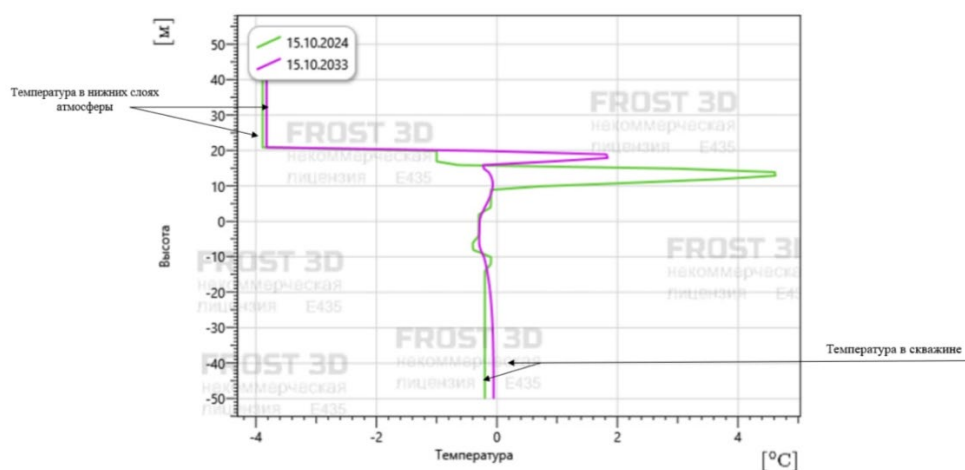


Рис. 3. Распределение температуры в скважине на середину октября 2024 и прогноз на октябрь 2033 г.

Таким образом, использование ЦМР высокого разрешения, построенной по данным ВЛС и привязанной к геодезической сети, обеспечивает геометрическую основу для теплофизического моделирования. Совместный анализ деформаций дорожного полотна и прогнозных изменений температурного поля мерзлоты

позволяет идентифицировать участки, критически уязвимые к криогенным процессам, и обосновывать инженерные мероприятия по стабилизации земляного полотна.

Обсуждение

Достигнутая точность геодезической сети (8 мм в плане) дает возможность в перспективе перейти к непрерывному ГНСС-мониторингу на части реперов, обеспечивая динамическую актуализацию цифрового двойника. Геодезическая основа выполняет роль каркаса, связывающего разновременные наблюдения: координаты реперов служат референсными точками для уравнивания облаков точек ВЛС, калибровки теплофизической модели и формирования единого базиса для расчета смещений.

Заключение

В 2024–2025 гг. на автодороге Надым-Салехард создана сеть из 23 реперов, координаты которых определены с точностью 8 мм (план) и 10 мм (высота) методом PPP (сервис AUSPOS). На примере моста через р. Хойзериена выполнено теплофизическое моделирование во Frost 3D с прогнозом деградации мерзлоты до 2033 г. (при тренде на потепление).

Разработана архитектура цифрового двойника, в котором спутниковая геодезия является системообразующим элементом, объединяющим данные ВЛС, мониторинга и численных расчетов. Прототип двойника позволяет анализировать текущее состояние объекта и делать прогнозные сценарии. Дальнейшее развитие предполагает переход к непрерывному ГНСС-мониторингу, использование машинного обучения для классификации деформаций и ассимиляцию измерений в теплофизическую модель, что обеспечит предиктивное управление инфраструктурой в криолитозоне.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Губернатора ЯНАО (проект № 601-19-01/13). Авторы благодарят Научный центр изучения Арктики (г. Салехард) за предоставленные данные.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Земцов А. А. Геоморфология Западно-Сибирской равнины (северная и центральная часть). Томск: Изд-во Том. ун-та, 1976. 344 с.
2. AUSPOS. Online GPS Processing Service [Электронный ресурс]. – URL: <https://gnss.ga.gov.au/auspos> (дата обращения: 14.05.2026).
3. ГОСТ Р 59562-2021. Съёмка аэрофототопографическая. – М.: Стандартинформ, 2021. – 35 с.
4. Ерофеев А. А., Шкуренок А. Р., Саломаха М. А., Хон А. В., Шемяков С. С. Динамика рельефа автодороги Надым-Салехард по данным воздушного лазерного сканирования и геодезического контроля // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625045.
5. FROST 3D [Электронный ресурс] // frost3d.ru: [сайт]. – URL: <https://frost3d.ru/>

6. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий на объекте «Мост через реку Хойзериена», Научный центр изучения Арктики, Салехард, 2025.
7. Шкуренко А. Р., Ерофеев А. А., Еремеев В. Ф., Хон А. В., Шемяков С. С. Материалы плано-высотного геодезического обоснования лазерного сканирования автодороги Надым-Салехард // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625731.
8. ГОСТ Р 57700.37-2021. Численное моделирование физических процессов. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021. – 15 с.
9. Долгополов Д. В., Баборыкин М. Ю., Жидиляева Е. В., Мелкий В. А. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2 (52). – С. 25–34.
10. Валишев Ф. Р., Ерофеев А. А., Шемяков С. С., Хон А. В., Погребняк С. Д. Каталог экзогенных процессов рельефообразования у основания автодороги Надым-Салехард // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026620409.
11. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. – LLC, 2015. – 32 p.
12. IGS – International GNSS Service [Электронный ресурс]. – URL: <http://igs.org> (дата обращения: 14.05.2026).
13. LiDAR360 V5.0 User Guide [Электронный ресурс]. – URL: <https://greenvalleyintl.com> (дата обращения: 14.05.2026).

© Ф. Р. Валишев, С. С. Шемяков, А. А. Ерофеев, 2026

Б. В. Содномов^{1✉}, В. Н. Черных¹, А. А. Аюржанаев¹, Е. Ж. Гармаев¹

Оценка влияния наледей на инженерные сооружения в Селенгинском среднегорье с использованием методов ДЗЗ

¹Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация
e-mail: sodnomov@binm.ru

Аннотация. В работе рассматриваются возможности комплексного применения методов дистанционного зондирования Земли для оценки влияния наледных процессов на инженерные сооружения в пределах Селенгинского среднегорья. Используются спутниковые снимки, материалы аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов, цифровые модели рельефа и данные наземного лазерного сканирования. Особое внимание уделено мостовым переходам, подходам к мостам и участкам транспортной инфраструктуры, подверженным сезонному наледообразованию. На основе сопоставления разновременных пространственных данных выполнен анализ динамики наледей, выявлены устойчивые зоны их формирования и определены основные типы воздействия на инженерные сооружения. Показано, что наледи способны вызывать частичное перекрытие русел, подтопление прилегающих территорий и изменение русловых процессов. Использование высокодетальных моделей поверхности и облаков точек позволило оценить морфологические особенности наледей и характер их взаимодействия с элементами инфраструктуры. Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов ДЗЗ, фотограмметрии и лазерного сканирования для мониторинга наледной опасности, оценки инженерных рисков и формирования геоинформационной базы данных наледных процессов.

Ключевые слова: наледи, ДЗЗ, БПЛА, цифровая модель рельефа, Селенгинское среднегорье

B. V. Sodnomov^{1✉}, V. N. Chernikh¹, A. A. Ayurzhanaev¹, E. Zh. Garmaev¹

Assessment of icings on engineering structures in the Selenginsk middle mountains using the remote sensing method

¹Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation
e-mail: sodnomov@binm.ru

Abstract. This paper examines the potential for integrated application of Earth remote sensing methods to assess the impact of aicing processes on engineering structures within the Selenga midlands. Satellite imagery, aerial photography from unmanned aerial vehicles, digital elevation models, and terrestrial laser scanning data are used. Particular attention is paid to bridge crossings, approaches to bridges, and sections of transport infrastructure susceptible to seasonal aicing. By comparing spatial data from different periods, an analysis of aicing dynamics is performed, stable zones of formation are identified, and the main types of impact on engineering structures are determined. It is shown that aicing can cause partial channel closure, flooding of adjacent areas, and changes in channel processes. The use of highly detailed surface models and point clouds made it possible to assess the morphological features of aicing and the nature of its interaction with infrastructure elements. The obtained results confirm the potential of using remote sensing, photogrammetry and laser scanning methods for monitoring ice hazards, assessing engineering risks and creating a geoinformation database of ice processes.

Keywords: icings, remote sensing, UAVs, digital elevation model, Selenginsk middle mountains

Введение

Селенгинское среднегорье – крупная орографическая область к югу от горного обрамления оз. Байкал, включающая территорию с низкой среднегорным рельефом, расположенную между Саяно-Байкальским становым нагорьем, Витимским плоскогорьем и Хэнтэй-Даурским нагорьем [1, 2]. Территория характеризуется сочетанием среднегорного рельефа, резко континентального климата и значительной сезонной изменчивости гидрологических условий. Для исследуемой территории характерны продолжительный зимний период, глубокое промерзание грунтов и развитие сезонных наледных процессов.

Наледи – это слоистые ледяные массивы или корки на поверхности земли, льда или инженерных сооружений, образовавшиеся при замерзании периодически изливающихся природных или техногенных вод [3]. На территории Селенгинского среднегорья. На территории Селенгинского среднегорья зарегистрировано 7,7 тыс. наледей, приуроченных преимущественно к долинам малых и средних рек, руслам ручьев и зонам разгрузки подземных вод [4]. В ряде случаев развитие наледей становится причиной возникновения чрезвычайных ситуаций и наносит ущерб инженерной инфраструктуре. Особенно уязвимыми оказываются мостовые переходы, подходы к мостам и водопропускные сооружения, расположенные в долинах малых рек и временных водотоков [5, 6].

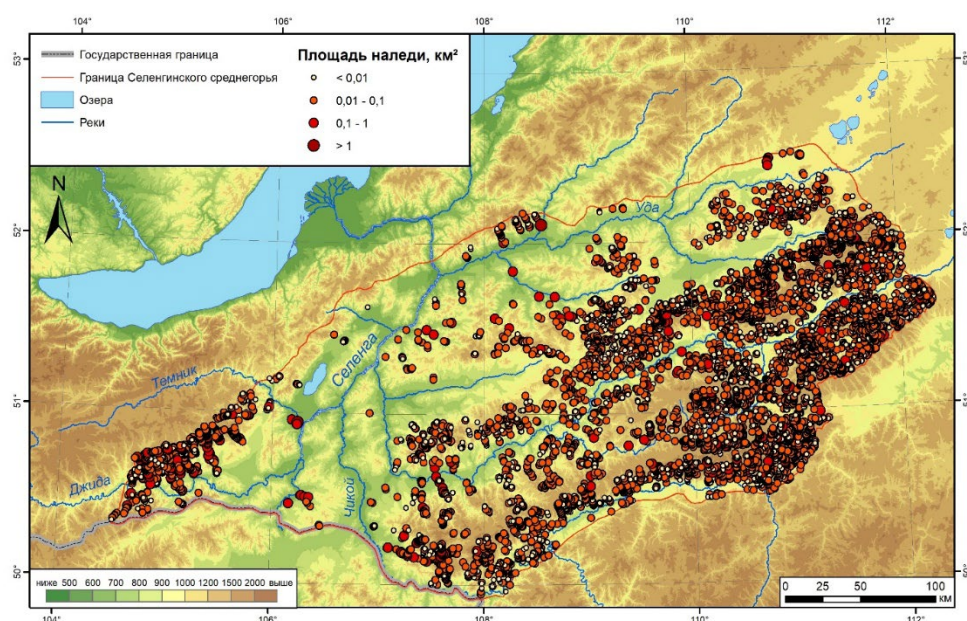


Рис. 1. Карта распространения наледей в Селенгинском среднегорье

Традиционные наземные обследования позволяют выявить факт развития наледи, однако они ограничены по охвату территории и не всегда дают возможность оценить межгодовую изменчивость наледей. В этой связи перспективным является комплексное использование дистанционного зондирования Земли: спутниковых

снимков, данных с БПЛА, а также цифровые модели, полученные в результате наземного лазерного сканирования. Преимущества спутниковых снимков заключаются в широком территориальном охвате, регулярности наблюдений, возможности мониторинга труднодоступных территорий и анализа изменений во времени. Применение беспилотных летательных аппаратов рассматривается как перспективный способ оперативного и экономически эффективного мониторинга окружающей среды [7]. Преимущества наземного лазерного сканирования: высокая точность, детальность, оперативность съемки, возможность работы в труднодоступных районах, получение плотного облака точек и создание точных 3D-моделей местности и объектов.

Методы и материалы

В рамках исследования были рассмотрены несколько участков мостовых переходов, на которых проводилась фотофиксация наледных процессов в разные годы. Для двух объектов дополнительно были получены высокодетальные материалы аэрофотосъемки и наземного лазерного сканирования.

В последние годы методы дистанционного зондирования и фотограмметрии активно применяются для анализа криогенных и ледовых процессов, включая картографирование ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа, построение цифровых моделей поверхности и мониторинг динамики природных объектов [8].

Основу исследования составили материалы полевых обследований, выполненных в зимний и весенний периоды. В ходе работ проводилась аэрофотосъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов. Полученные изображения использовались для построения высокодетальных пространственных моделей.

Для анализа наледных процессов использовались:

- 1) спутниковые снимки;
- 2) ортофотопланы исследуемых участков;
- 3) цифровые модели рельефа;
- 4) облака точек, полученные по данным наземного лазерного сканирования;
- 5) материалы фотофиксации.

Аэрофотосъемка выполнена с борта беспилотных летательных аппаратов DJI Phantom 4 Advanced. Съемки проводились в безоблачных условиях при одинаковых параметрах камеры, 70 %-ном продольном и поперечном перекрытии снимков с дополнительной привязкой снимков с помощью опознаков, а также с использованием метода РРК (post-processing kinematic), при котором координаты, полученные при съемке, уточняются после завершения полевых работ с использованием данных базовой станции. Фотограмметрическая обработка данных аэрофотосъемки с БПЛА выполнена в ПО Agisoft Metashape.

Лазерное сканирование выполнено с использованием наземной лазерной сканирующей системы Leica ScanStation C10, обеспечивающей высокоточную регистрацию облака точек на дальности до 300 м и со скоростью до 50 000 точек/с. Полученные данные обрабатывались в Leica Cyclone, где выполнялись импорт, регистрация,

очистка и подготовка облаков точек для дальнейшего инженерно-геометрического анализа [9].

Пространственный анализ выполнялся в ПО ArcGIS с использованием совмещения разновременных материалов. Сравнение ортофотопланов и цифровых моделей рельефа позволило выявить изменение границ наледей и особенности перераспределения ледяных масс.

Результаты

Полевые наблюдения и анализ данных ДЗЗ показали, что наледи оказывают комплексное воздействие на инженерные сооружения в пределах Селенгинского среднегорья.

На исследуемых участках выявлены следующие типы воздействия:

- аккумуляция льда в пределах мостовых переходов;
- частичное или полное перекрытие руслового пространства;
- подтопление подходов к мостам;
- перераспределение потоков воды вдоль насыпей и русловых деформаций.

Сопоставление разновременных ортофотопланов показало, что конфигурация и площадь наледей могут существенно изменяться в зависимости от гидрометеорологических условий конкретного года (рис. 2 а, б). При этом отдельные участки формирования наледей сохраняются в течение нескольких сезонов, что свидетельствует о наличии устойчивых факторов наледообразования.

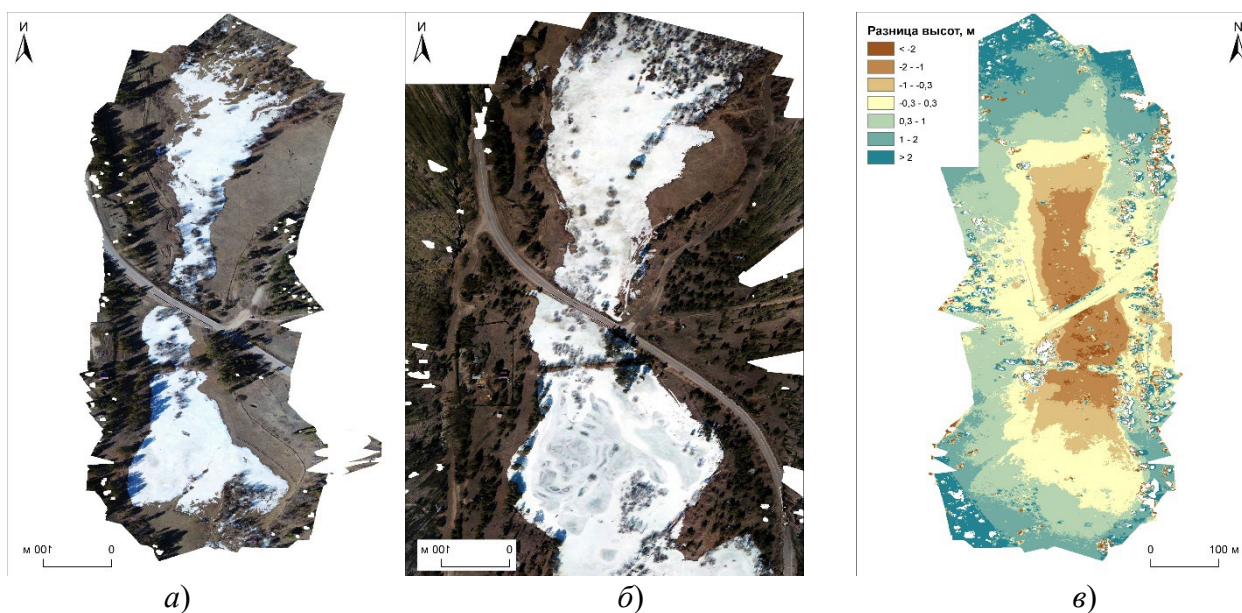


Рис. 2. Наледь на р. Воровка (Тарбагатайский район, Республика Бурятия):
а) ортофотоплан 31.03.2021 г., б) ортофотоплан 08.04.2026 г., в) разница высот,
полученная по ЦММ

Анализ цифровых моделей рельефа позволил выявить понижения рельефа и элементы русловой сети, способствующие аккумуляции наледного льда. В районах

мостовых переходов наблюдается влияние инженерных сооружений на перераспределение потоков воды и локализацию зон наледообразования (см. рис. 2 в).

Облака точек и высокودетальные модели поверхности позволили детально оценить морфологию наледей, включая высоту ледяных бугров, распределение ледяных масс и особенности взаимодействия наледи с конструктивными элементами мостов (рис. 3).

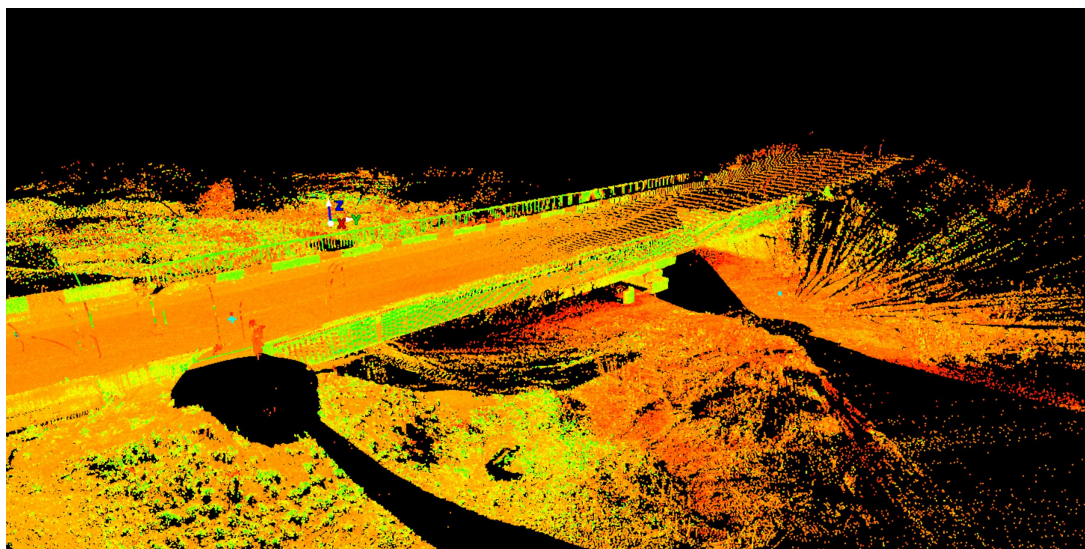


Рис. 3. Трехмерная модель (облако точек) автомобильного моста в районе р. Воронка

Обсуждение

Использование данных БПЛА, спутниковых снимков и наземного лазерного сканирования позволяет существенно расширить возможности изучения наледных процессов по сравнению с традиционными маршрутными обследованиями. Высокое пространственное разрешение ортофотопланов, цифровых моделей рельефа и облаков точек обеспечивает детальную фиксацию изменений микрорельефа, русловых деформаций и перераспределения ледяных масс в пределах инженерных сооружений и прилегающих территорий.

Одним из ключевых направлений дальнейших исследований является формирование специализированной геоинформационной базы данных наледных процессов и связанных с ними инженерных рисков. Такая база данных может включать сведения о местоположении наледей, площади и объемах ледяных образований, повторяемости их возникновения, гидрологических и метеорологических условиях формирования, а также информацию о типах инженерных сооружений и степени их подверженности наледному воздействию. Интеграция спутниковых данных, материалов БПЛА, наземного лазерного сканирования и результатов полевых обследований позволит создать единую систему пространственного мониторинга наледной опасности.

Создание подобной базы данных имеет не только научное, но и прикладное значение. Накопление многолетних пространственно-временных данных открывает

возможности для перехода от описательной оценки наледных процессов к количественному анализу наледной угрозы. На основе геоинформационных моделей предполагается разработка методов оценки вероятности формирования наледей, расчета потенциальных зон подтопления и прогнозирования опасности для участков транспортной инфраструктуры.

Перспективным направлением является использование цифровых моделей поверхности и облаков точек для мониторинга деформаций инженерных сооружений. Высокодетальные данные лазерного сканирования и фотограмметрии позволяют фиксировать изменения геометрии мостовых конструкций, деформации насыпей, изменение русловых форм и перераспределение наносов.

Полученные результаты согласуются с современными представлениями о влиянии криогенных процессов на инженерную инфраструктуру в районах сезонного промерзания и распространения многолетнемерзлых пород [6, 10]. Вместе с тем использование высокодетальных пространственных данных позволяет перейти к новому уровню исследований, связанному с количественной оценкой морфометрических параметров наледей, анализом изменений инженерных объектов и прогнозированием развития опасных природно-техногенных процессов.

Заключение

В ходе исследования показано, что наледи в Селенгинском среднегорье представляют собой значимый природно-техногенный фактор риска для мостовых переходов, подходов к ним и других элементов транспортной инфраструктуры. Наиболее опасными являются участки, где наледные образования формируются в пределах русел малых рек, в зонах разгрузки подземных вод и в местах изменения условий стока, поскольку именно здесь наледь способна вызывать подпор воды, частичное перекрытие руслового пространства и подтопление прилегающих территорий.

Установлено, что сочетание спутниковых данных, ортофотопланов, цифровых моделей рельефа, облаков точек и материалов фотофиксации позволяет эффективно выявлять пространственную динамику наледей, оценивать их морфологию и прослеживать устойчивые зоны наледообразования в разные годы. Использование БПЛА и наземного лазерного сканирования существенно повышает детальность анализа по сравнению с традиционными маршрутными обследованиями и даёт возможность более точно интерпретировать связь наледных процессов с инженерными сооружениями.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов ДЗЗ и фотограмметрии для мониторинга наледной опасности и обоснования инженерных решений в районах развития наледей. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных данных при инженерно-геологических изысканиях, оценке уязвимости мостовых переходов и формировании геоинформационной базы наледных участков для дальнейшего мониторинга и прогноза.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 24-47-03008 «Наледи в трансграничном бассейне р. Селенга: роль в природных ландшафтах и социально-экономические угрозы для хозяйственных систем в условиях меняющегося климата».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фадеева Н.Е. Селенгинское среднегорье. – Улан-Удэ: Бурятское кн. изд-во, 1963. – 170 с.
2. Дамбиев Э.Ц. Физико-географическое районирование Бурятии // Вестник Бурятского государственного университета. Серия 3. География. Геология. Вып. 1. Улан-Удэ. 1997. с. 26–36
3. Алексеев В. Р. Наледи. Новосибирск: Наука, 1987.
4. Черных В. Н. Влияние наледей на природно-антропогенные системы Селенгинского среднегорья: дис. ... канд. геогр. наук: 1.6.21, геоэкология (географические науки). — Улан-Удэ, 2024.
5. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации искусственных сооружений автомобильных дорог на водотоках с наледями / Минавтодор РСФСР. – М.: Транспорт, 1989. – 152 с.
6. Толстихин О. Н. Наледи и подземные воды Восточной Сибири. – Новосибирск: Наука, 1974. – 164 с.
7. Anderson, K. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology / K. Anderson, K.J. Gaston // Front. Ecol. Environ. 2013. 11. P. 138–146.
8. Сизов О. С. Дистанционное картографирование ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа в бассейне р. Надым (Север Западной Сибири) // Географический вестник. – 2020. – № 1(52). – С. 103–118.
9. Leica ScanStation C10. [Электронный ресурс]. URL: https://gfk-leica.ru/files/catfiles/scan/scanstation-c10_ttch.pdf (дата обращения: 17.05.2026).
10. Buddo I., Sharlov M., Shelokhov I. et al. Applicability of Transient Electromagnetic Surveys to Permafrost Imaging in Arctic West Siberia // Energies. – 2022. – Vol. 15(5). – 1816.

© Б. В. Содномов, В. Н. Черных, А. А. Аюржанаев, Е. Ж. Гармаев, 2026

П. В. Воронина^{1,2}✉

Сравнительный анализ динамики снежного покрова в Новосибирской области по данным метеорологических и спутниковых наблюдений (2000–2024 гг.)

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: pol.voronina@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты сравнения спутниковых данных MODIS (продукт MOD10A1) о сроках установления и схода снежного покрова с данными наземных наблюдений по шести станциям Новосибирской области за период 2000–2024 гг. Установлены статистические характеристики расхождений, выявлены пространственно-временные закономерности и аномалии. Показано, что спутниковые данные демонстрируют высокую сходимость с наземными измерениями (коэффициент корреляции более 0,8), однако систематически завышают продолжительность залегания снежного покрова в лесостепной зоне. Выявлена тенденция к сокращению периода снежности на 5–7 дней за 25-летний период.

Ключевые слова: снежный покров, MODIS, дистанционное зондирование, Новосибирская область, верификация, климатические изменения, даты схода снега, даты установления снега

P. V. Voronina^{1,2}✉

Comparative analysis of snow cover dynamics in the Novosibirsk region based on meteorological and satellite observations (2000–2024)

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: pol.voronina@gmail.com

Abstract. The study is devoted to the analysis of a comparison of MODIS satellite data (MOD10A1 product) on the timing of snow cover onset and melting with ground-based observations from six stations in the Novosibirsk region for the period 2000–2024. Statistical characteristics of the discrepancies are determined, and spatiotemporal patterns and anomalies are identified. It is shown that satellite data demonstrate high convergence with ground-based measurements (correlation coefficient greater than 0.8); however, they systematically overestimate the duration of snow cover in the forest-steppe zone. A trend toward a reduction in the snowfall period by 5–7 days over a 25-year period is revealed.

Keywords: MODIS, satellite remote sensing data processing, snow cover, onset and destruction dates of snow cover

Введение

Снежный покров является одним из наиболее динамичных и критически важных компонентов климатической системы Земли. Он оказывает непосредственное

влияние на глобальный радиационный баланс, гидрологический режим рек и тепловое состояние почв, выступает в качестве эффективного изолятора, регулирует глубину промерзания грунтов и энергообмен между атмосферой и литосферой [1, 2]. В Сибири – регионе с выраженным холодным периодом – весеннее снеготаяние часто обеспечивает до 50% и более годового речного стока и определяет водную обеспеченность обширных территорий [2].

В условиях современного глобального потепления наблюдается значительная трансформация характеристик снежного покрова. Многочисленные исследования фиксируют сокращение продолжительности залегания снега в Северном полушарии, особенно весной, что коррелирует с устойчивым повышением приземной температуры воздуха [2, 3]. На различных территориях снежный покров по-разному реагирует на изменения климата. Так, для Сибири и северо-востока Европейской территории России характерен рост зимней аккумуляции снега, а на западе Европейской части страны наблюдаются обратные тенденции, связанные с увеличением числа оттепелей [3, 4].

Традиционной основой для анализа многолетней динамики снежного покрова служат данные государственной метеорологической сети (ГМС). Однако дискретный характер наземных наблюдений ограничивает возможности для полноценной оценки пространственной неоднородности распределения снега, особенно в условиях сложного рельефа или на малообжитой территории [5, 6]. Этот недостаток может быть компенсирован использованием данных дистанционного зондирования Земли, в частности продуктов спектрорадиометра MODIS. Спутниковые данные позволяют получать регулярную информацию о площадном распространении снежного покрова с высоким пространственным разрешением [7–9].

Многочисленные валидационные исследования подтвердили высокую сходимость (до 80-90%) продуктов MODIS «snow cover» с наземными наблюдениями при толщине снега более 2 см, при этом основные расхождения фиксируются в переходные сезоны (осенью и весной) [5].

Для территории Новосибирской области, расположенной в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины, характерен резко континентальный климат с продолжительной холодной зимой, длящейся около полугода [10–12]. В работе [13], выполненной только по спутниковым данным MODIS для всей территории Новосибирской области в целом (без выделения отдельных метеостанций) за период 2000–2025 гг., установлено, что средняя продолжительность зимнего сезона в регионе составляет 192 дня, при этом выявлен тренд на её сокращение со скоростью 0,8 дня/год. Одновременно с этим наблюдается увеличение продолжительности залегания снега (+0,5 дня/год) при ускорении фаз его установления (–0,3 дня/год) и разрушения (–0,4 дня/год), что свидетельствует о сложной региональной реакции снежного покрова на современные климатические изменения [13].

Однако, несмотря на широкое применение обоих подходов, сравнительный анализ данных метеорологических станций и спутниковых продуктов для оценки динамики снежного покрова на уровне конкретного региона (например, Ново-

сибирской области) остается актуальной задачей. С одной стороны, в работах по России в целом показано, что в Западной Сибири в начале XXI века наблюдалось сокращение продолжительности залегания снежного покрова, обусловленное как уменьшением твердых осадков, так и более ранним наступлением весны [7]. С другой стороны, существуют данные о региональном увеличении максимальных снегозапасов в этом макрорегионе [7]. Более того, некоторые исследования подчеркивают значительную пространственную и временную изменчивость плотности и толщины снега на территории России [14].

Цель настоящей работы – провести сравнительный анализ сроков установления и схода устойчивого снежного покрова на территории Новосибирской области за период 2000–2024 гг. по данным метеорологических станций и спутниковым данным MODIS, выявить основные закономерности и тренды, а также дать рекомендации по совместному использованию этих данных.

Территория исследования

Как и в [10,13] территория исследования охватывает Новосибирскую область, расположенную на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. Климат Новосибирской области – континентальный с холодной продолжительной зимой (160–180 дней) и тёплым, относительно коротким летом [11,12]. Устойчивый снежный покров устанавливается, как правило, в первой половине ноября и разрушается в конце марта – начале апреля. За последние 20 лет в регионе зафиксированы значительные климатические изменения, в том числе в режиме снежного покрова [15]. Характерной особенностью региона является значительная межгодовая и пространственная изменчивость снежного покрова, обусловленная как циркуляционными факторами, так и особенностями рельефа и подстилающей поверхности.

В работе использованы данные шести метеорологических станций (из архива ВНИИГМИ-МЦД) [16], представляющих различные ландшафтные зоны региона: Барабинск, Огурцово, Татарск – лесостепные и степные, Маслянино, Болотное, Северное – лесные и предгорно-таежные ландшафты.

Спутниковая информация отбиралась и обрабатывалась средствами облачной платформы для геопространственного анализа больших данных Google Earth Engine (GEE) [17]. Поставленная задача решалась с использованием продукта MOD10A1 V6 Snow Cover Daily Global 500m (Terra/MODIS) [18].

Различия в растительном покрове, степени увлажнения и рельефе определяют пространственную неоднородность режима снежного покрова, что делает Новосибирскую область удобным полигоном для сравнительного анализа метеорологических и спутниковых данных [19].

Анализ проводился отдельно для дат схода (весенний период) и дат установления (осенне-зимний период) снежного покрова.

Результаты

Статистическая обработка данных за 25-летний период выявила устойчивую корреляцию между наземными и спутниковыми измерениями (табл. 1 и 2). В табл. 1 и 2 представлены среднемноголетние даты установления и разрушения

снежного покрова и статистические показатели: отклонение спутниковых данных от метеорологических, значения линейного тренда для метеорологических и спутниковых данных (изменение даты установления и разрушения снежного покрова в днях за 10 лет). Линейные тренды рассчитаны методом наименьших квадратов; их значимость оценивалась по критерию Стьюдента при доверительном уровне 0,9.

Средние даты установления снежного покрова соответствуют концу октября – началу ноября (дни от начала года 297–310). Самое раннее установление по спутнику в Болотном (297-й день), самое позднее по наземным данным в Татарске (310-й день). Спутник фиксирует установление на 5–7 дней раньше наземных станций. Это ожидаемо, так как MODIS обнаруживает даже неглубокий снежный покров, тогда как метеостанция требует определённой высоты и устойчивости.

Таблица 1. Среднемноголетние даты установления снежного покрова и статистические показатели

	Наземные данные	Спутниковые данные	Отклонение	Коэффициент корреляции	Тренд метео	Тренд спутник
Барабинск	04.11	30.10	–5,60	0,9	0,0	–0,50
Болотное	30.10	24.10	–5,40	0,9	–1,7	–1,40
Маслянино	01.11	26.10	–5,88	0,8	–1,7	0,18
Огурцово	04.11	28.10	–7,24	0,8	–0,9	0,30
Северное	27.10	25.10	–4,80	0,8	2,1	–2,60
Татарск	06.11	31.10	–6,12	0,8	–3,4	–1,50

Тренды: по наземным данным, за исключением Северного, отрицательные (установление снега наступает раньше), особенно в Татарске (–3,36) и Болотном (–1,70). Исключение составляет станция Северное, где по наземным данным отмечено запаздывание установления снежного покрова (+2,1 дня/10 лет), что может быть связано с локальными орографическими или микроклиматическими особенностями. По спутнику тренды слабее, а на двух станциях (Маслянино и Огурцово) положительные (0,18 и 0,35 дня/10 лет соответственно), что может отражать локальные особенности пунктов (например, влияние лесного полога, задерживающего тонкий снег, или методическую нестабильность маски снега MODIS в переходные сезоны). Исключение составляет станция Северное, где по наземным данным отмечено запаздывание установления снежного покрова (+2,1 дня/10 лет), что, вероятно, связано с локальными орографическими или микроклиматическими особенностями северных районов области.

Средние даты схода приходятся на первую-третью декаду апреля (дни от начала года 96–109). Самый ранний сход – в Барабинске и Татарске, самый поздний – в Маслянино и Болотном. Спутниковые данные фиксируют сход в среднем на 1–7 дней позже наземных. Наибольшее расхождение отмечено для Барабинска

(6,7 дня), наименьшее – для Огурцово (1 день). Среднее по всем пунктам расхождение составляет 4 дня. Это связано с пространственным разрешением продуктов MODIS (500 м) и разными критериями «полного исчезновения снега»: наземная станция фиксирует сход при сохранении отдельных пятен, спутник – только при полном отсутствии снега в пикселе, включая затенённые участки и впадины. На большинстве станций сход смещается к более ранним датам (от –1 до –3,8 дня за 10 лет). Наиболее раннее разрушение снега выражено в Болотном –3,8 дня/10 лет по наземным и – 3,5 дня/10 лет по спутниковым наблюдениям. Для Барабинска и Татарска метеотренды близки к нулю (+0,05 и +0,15), но спутниковые показывают заметное раннее снеготаяние: –1,3 и –2,6 дня/10 лет соответственно, возможно, из-за различий в критериях «схода» на открытой местности и на усреднённом пикселе, включающем элементы микрорельефа.

Таблица 2. Среднемноголетние даты схода снежного покрова и статистические показатели

	Наземные данные	Спутниковые данные	Отклонение	Коэффициент корреляции	Тренд метео	Тренд спутник
Барабинск	06.04	13.04	6,64	0,78	0,05	–1,3
Болотное	14.04	19.04	4,96	0,90	–3,80	–3,5
Маслянино	16.04	19.04	3,04	0,90	–2,80	–2,3
Огурцово	13.04	14.04	1,04	0,80	–2,30	–1,0
Северное	19.04	18.04	–0,88	0,80	–1,30	–3,4
Татарск	06.04	11.04	4,28	0,70	0,15	–2,6

Средние по шести станциям тренды разрушения снежного покрова составили –1,67 дня/10 лет по метеоданным и –2,14 дня/10 лет по спутниковым данным, что указывает на устойчивую тенденцию к более раннему разрушению снежного покрова в регионе. Количественная близость этих величин подтверждает принципиальную возможность совместного использования обоих типов данных для мониторинга региональных изменений.

Проведённый сравнительный анализ выявил как закономерные, так и неочевидные различия между данными метеорологических станций и спутниковыми продуктами MODIS при оценке характеристик снежного покрова в Новосибирской области в 2000–2024 гг. В целом, оба типа данных демонстрируют согласованную направленность климатических изменений – тенденцию к более раннему сходу снежного покрова и, хотя и менее выраженную, к более раннему его установлению. Однако величина и знак расхождений между ними не являются постоянными и зависят от сезона, географического положения пункта наблюдения и, вероятно, локальных ландшафтных условий.

При переходе к отдельным годам различия становятся значительными, особенно в осенний период, что накладывает ограничения на прямое объединение рядов без предварительной калибровки и учёта локальных условий. Спутниковые

данные MODIS являются ценным дополнением к наземным наблюдениям, позволяя оценивать пространственную неоднородность сроков установления и схода снега, но не могут полностью заменить метеорологическую сеть, особенно для изучения многолетней динамики в переходные сезоны.

Заключение

В работе выполнен сравнительный анализ сроков установления и схода устойчивого снежного покрова на территории Новосибирской области за период 2000–2024 гг. по данным шести метеорологических станций и спутниковым продуктам MODIS. Направленность климатических изменений, выявляемая по обоим типам данных, совпадает: наблюдается тенденция к более раннему сходу снежного покрова (в среднем $-0,17 \dots -0,20$ дня за 10 лет) и, с меньшей достоверностью, к более раннему его установлению. Это согласуется с опубликованными ранее результатами для Западной Сибири.

Количественные расхождения между спутниковыми и наземными данными носят систематический характер. При сходе снега спутниковые данные «запаздывают» на 1–7 дней (в среднем 4 дня) относительно наземных наблюдений. При установлении снежного покрова спутник, напротив, «опережает» наземные наблюдения на 5–7 дней. Эти различия обусловлены критериями детектирования, пространственным разрешением (500 м) и чувствительностью MODIS к тонкому снежному покрову.

Наибольшая сходимостр трендов (Болотное, Маслянино) характерна для лесных и предгорно-таёжных районов. Наибольшие расхождения (Барабинск, Татарск) отмечены для открытых лесостепных и степных ландшафтов, где локальные микроклиматические эффекты и методические различия проявляются сильнее.

Спутниковые данные не могут полностью заменить наземные наблюдения, особенно для исследования переходных сезонов (осень, весна), где маска снега MODIS становится нестабильной. Однако они позволяют восполнить пробелы в пространственной информации и дают возможность экстраполировать точечные метеорологические данные на региональный уровень. При совместном использовании двух типов данных рекомендуется вводить сезонные и региональные поправки. Для долгосрочных трендов допустимо объединение рядов. Полученные результаты могут быть использованы при гидрологическом прогнозировании (половодье), оценке рисков для сельского хозяйства, а также при валидации климатических моделей для территории юга Западной Сибири.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang, T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview // *Reviews of Geophysics*, 2005, 43(4).
2. Bormann K.J., Brown R.D., Derksen, C., Painter T.H. Estimating snow-cover trends from space // *Nature Climate Change*, 2018, 8(11), 924–928.
3. Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950–2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // *Криосфера Земли*. 2018. Т. XXII. № 4. С 65–75.

4. Popova, V. Winter snow depth variability over northern Eurasia in relation to recent atmospheric circulation changes // *International Journal of Climatology*, 2007, 27(12), 1721-1733.
5. Истомина Е.А., Максютова Е.В. Возможность использования продукта MODIS «snow cover» для характеристики пространственной структуры снежного покрова Предбайкалья // *Лёд и Снег*. 2014. № 1 (125). С. 66–72.
6. Gafurov A., Vorogushyn S., Farinotti D., Duethmann D., Merkushkin A., Merz B. Snow-cover reconstruction methodology for mountainous regions based on historic in situ observations and recent remote sensing data // *The Cryosphere*, 2015, 9(2), 451-463.
7. Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Сроки залегания снежного покрова на территории России в начале XXI в. по спутниковым данным // *Лёд и Снег*. 2017. Т. 57. № 1. С. 25–33.
8. Huang X., Deng J., Ma X., Wang Y., Feng Q., Hao X., Liang T. Spatio-temporal dynamics of snow cover based on multi-source remote sensing data in China // *The Cryosphere Discussions*, 2016, 1-21.
9. Cheval S., Dumitrescu A. The July urban heat island of Bucharest as derived from MODIS images // *Theoretical and Applied Climatology*. 2009. No. 96. P. 145-153.
10. Воронина П.В. Сроки установления и разрушения снежного покрова на территории Новосибирской области по спутниковым данным // *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2024, Т.4, № 1, С. 69–77.
11. Почвенно-климатический атлас Новосибирской области. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. – 121 с.
12. Западно-Сибирская низменность. – М.: География, 1963. – 262 с.
13. Воронина П.В. Пространственное распределение сроков установления снежного покрова на территории Новосибирской области по спутниковым данным // *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2025, Т.4, № 1, С. 3–10.
14. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Пространственная и временная изменчивость толщины и плотности снежного покрова на территории России // *Лёд и Снег*, 2014, 54(4), 72-80.
15. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. – Москва, 2025. – 135 стр.
16. ВНИИГМИ-МЦД. Режим доступа: <http://www.meteo.ru> (дата обращения 01.07.2025).
17. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote sensing of Environment*. 2017. V. 202. pp. 18-27. doi:10.1016/j.rse.2017.06.031.
18. Hall D.K., Salomonson V.V., Riggs G.A. MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid. Version 6. // Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. 2016.
19. Воронина Л.В., Гриценко А.Г. Климат и экология Новосибирской области. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 228 с.

© П. В. Воронина, 2026

Р. А. Дьяченко^{1,2}, Д. А. Гура^{1,3}, С. А. Ярутин^{2✉}, Т. А. Тихонов²

Подход к формированию синтетических данных лазерного сканирования промышленных объектов

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация

²Кубанский государственный технологический университет,
г. Краснодар, Российская Федерация

³Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Российская Федерация
e-mail: yarutinsa@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается метод генерации синтетических LiDAR-облаков точек промышленных объектов для задач машинного обучения. Предложен параметрический подход, основанный на иерархическом представлении сцены, биом-ориентированном моделировании функциональных зон и имитации лазерного сканирования методом трассировки лучей. Реализовано формирование семантически размеченных промышленных сцен и облаков точек с контролируемыми характеристиками плотности, покрытия и окклюзий. Сформирован датасет объемом порядка $1,8 \times 10^8$ точек при 48 позициях сканирования и 12 семантических классах. Оценка качества по метрикам сегментации и геометрической реконструкции показала значения Accurasy до 0,96, IoU до 0,87 и RMSE до 0,056 м. Установлено повышение качества сегментации на 8–15% при использовании синтетических данных. Полученные результаты подтверждают пригодность предложенного подхода для обучения и валидации алгоритмов обработки LiDAR-облаков точек промышленных объектов.

Ключевые слова: LiDAR, облака точек, синтетические данные, машинное обучение, промышленный объект, лазерное сканирование, семантическая разметка, параметрическая генерация, 3D-реконструкция, BIM-моделирование

R. A. Dyachenko^{1,2}, D. A. Gura^{1,3}, S. A. Yarutin^{2✉}, T. A. Tikhonov²

An approach to the formation of synthetic laser scanning data for industrial facilities

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Moscow, Russian Federation

²Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

³Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation
e-mail: yarutinsa@yandex.ru

Abstract. A method for generating synthetic LiDAR clouds of points of industrial facilities for machine learning tasks is considered. A parametric approach based on a hierarchical representation of the scene, biome-oriented modeling of functional zones and simulation of laser scanning by ray tracing is proposed. The formation of semantically marked industrial scenes and clouds of points with controlled characteristics of density, coverage and occlusions is implemented. A dataset has been formed with a volume of about 1.8×10^8 points with 48 scanning positions and 12 semantic classes. The quality assessment based on segmentation and geometric reconstruction metrics showed Accuracy values up to 0.96, IoU up to 0.87, and RMSE up to 0.056 m. An increase in segmentation quality by 8–15% was found when using synthetic data. The results obtained confirm the suitability of the

proposed approach for training and validating algorithms for processing LiDAR clouds of points of industrial facilities.

Keywords: LiDAR, point clouds, synthetic data, machine learning, industrial facility, laser scanning, semantic markup, parametric generation, 3D reconstruction, BIM modeling

Введение

Предлагаемый подход основан на процедурной генерации промышленной сцены с параметрически управляемой пространственной структурой. Формирование сцены выполняется на основе иерархического представления, включающего планировочную структуру, функциональные зоны и внутреннее технологическое наполнение. Параметризация обеспечивает управление плотностью размещения объектов, типами конструкций и пространственной организацией сцены. В состав генерируемых объектов входят промышленное оборудование, трубопроводные системы, инженерные коммуникации и строительные конструкции.

Моделирование лазерного зондирования реализуется посредством имитации работы LiDAR-сканеров с использованием трассировки лучей [1]. Выполняется размещение станций сканирования, моделирование процесса съёмки и формирование облаков точек с учётом физических эффектов, включая шумы измерения, окклюзии и неоднородность распределения плотности. Результирующие данные формируются в формате PLY с автоматической классовой разметкой объектов [2].

Программная реализация включает модуль генерации сцены, подсистему моделирования LiDAR-сканирования и средства экспорта данных. Архитектура обеспечивает возможность пакетной генерации датасетов, масштабирование объёма данных и вариативность параметров сцены и сканирования [3, 4].

В результате работы сформирован набор синтетических облаков точек промышленных объектов с полной семантической разметкой и контролируемыми характеристиками. Обеспечена вариативность геометрии и конфигурации сцен, а также подтверждена пригодность данных для обучения моделей машинного обучения и тестирования алгоритмов обработки облаков точек.

Практическая значимость работы заключается в снижении затрат на получение размеченных LiDAR-данных и возможности моделирования редких, сложных и труднонаблюдаемых сценариев [5]. Предлагаемый подход может применяться в задачах мониторинга промышленных объектов, построения цифровых двойников и анализа данных дистанционного зондирования Земли [6].

Полученные результаты показывают, что предложенная методика позволяет формировать синтетические сцены, адекватно воспроизводящие особенности лазерного сканирования промышленных объектов. Разработанный подход обеспечивает решение проблемы дефицита размеченных данных и может использоваться для разработки, обучения и валидации алгоритмов обработки облаков точек.

Методы

Предлагаемый подход основан на процедурной генерации промышленной сцены, формализуемой как иерархическая параметрическая система

$$S = (V, E, A),$$

где V – множество элементов сцены, E – множество связей между ними, A – множество геометрических и семантических атрибутов [7]. Генерация сцены рассматривается как отображение параметрического пространства в множество допустимых конфигураций:

$$S = G(\theta),$$

где G – оператор генерации, θ – вектор параметров сцены [8]. В состав параметров входят характеристики планировочной структуры, распределения функциональных зон, плотности размещения объектов и пространственной организации сцены [9, 10].

Формирование сцены выполняется на основе биом-ориентированного подхода, при котором каждому помещению сопоставляется функциональная зона

$$B_k = \{C_k, D_k, R_k\},$$

где C_k – множество допустимых классов объектов, D_k – параметры плотности и распределения, R_k – ограничения размещения [11]. Для технологических биомов характерны высокая плотность объектов, многоуровневое размещение оборудования и развитая система инженерных коммуникаций [12]. Плотность размещения объектов определяется как

$$\rho_k = \frac{N_k}{V_k},$$

где N_k – число объектов, V_k – объём помещения.

Генерация инженерной инфраструктуры выполняется на основе графового представления технологических связей

$$G_p = (V_p, E_p),$$

где вершины соответствуют единицам оборудования, а рёбра определяют наличие трубопроводных или кабельных соединений. Геометрия коммуникаций формируется посредством трассировки пространственных траекторий между связанными объектами с учётом ограничений сцены и минимальных расстояний.

Моделирование лазерного зондирования реализуется посредством имитации работы LiDAR-сканеров методом трассировки лучей. Пространство сцены предварительно преобразуется в совокупность осесовмещённых ограничивающих объёмов (AABB), используемых при вычислении пересечений лучей с объектами сцены [13]. Для каждой станции сканирования формируется множество точек

$$P_s = \{p_i(x_i, y_i, z_i, c_i)\},$$

где x_i, y_i, z_i — координаты точки, c_i — её семантический класс.

Размещение станций сканирования формализуется как задача покрытия множества целевых областей:

$$S^* \subseteq P,$$

где P — множество кандидатных позиций, S^* — подмножество станций, обеспечивающее максимальное покрытие сцены при минимальной избыточности наблюдений [14]. В процессе моделирования учитываются шумы измерения, окклюзии, ограничения поля зрения и неоднородность распределения плотности точек.

Формирование результирующего датасета включает генерацию per-station облаков точек с последующим объединением в интегральное облако:

$$P = \bigcup_{s \in S} P_s.$$

Экспорт данных реализован в формате PLY с автоматической семантической разметкой. Каждой точке сопоставляется идентификатор класса, формируемый на основе принадлежности соответствующего геометрического примитива [15].

Программная реализация включает модуль генерации сцены, подсистему моделирования LiDAR-сканирования и модуль экспорта данных. Архитектура поддерживает пакетную генерацию датасетов, вариативность параметров сцены и масштабирование объёма данных.

Заключение

В работе предложена методика генерации синтетических LiDAR-облаков точек промышленных объектов для задач машинного обучения, основанная на параметрическом моделировании сцены и имитации процесса лазерного сканирования. Разработанный подход обеспечивает формирование иерархически структурированных промышленных сцен с автоматической семантической разметкой и последующей генерацией облаков точек с контролируемыми характеристиками плотности, покрытия и окклюзий.

В рамках исследования реализована процедурная генерация промышленной сцены, включающая формирование планировочной структуры, распределение функциональных биомов, генерацию инженерной инфраструктуры и моделирование технологических связей между объектами. Выполнена интеграция модели сцены с симуляцией LiDAR-сканирования методом трассировки лучей, учитывающей эффекты окклюзий, неоднородности плотности и ограничений поля зрения.

Сформирован синтетический LiDAR-датасет промышленного объекта, включающий 48 позиций сканирования и порядка $1,8 \times 10^8$ точек при среднем значении $3,75 \times 10^6$ точек на одну станцию. Датасет содержит 12 семантических классов и полностью размечен без использования ручной аннотации.

Проведённый анализ показал, что увеличение числа станций сканирования с 4 до 48 приводит к росту полноты покрытия сцены с 82% до 99% и снижению доли слепых зон с 18% до 1%. Установлено существование области насыщения в диапазоне 24–32 станций, при которой дальнейшее увеличение числа наблюдений приводит к росту избыточности данных без существенного улучшения покрытия.

Оценка качества данных на задачах семантической сегментации и геометрической реконструкции показала значения Ассигасы до 0,96, IoU до 0,87 и RMSE до 0,056 м. Наиболее высокие значения метрик достигаются для конструктивных элементов сцены, тогда как для трубопроводов и кабельных трасс наблюдается снижение Ассигасы до 0,89–0,91 и IoU до 0,72–0,76 вследствие высокой геометрической сложности и влияния окклюзий.

Сравнение с реальными LiDAR-данными промышленного объекта показало преимущества синтетического подхода, включая полную семантическую разметку, наличие эталонной геометрии и контролируемый уровень шумов. Дополнительно установлено, что использование синтетического датасета позволяет повысить качество сегментации на 8–15% по метрикам IoU и Ассигасы.

Полученные результаты подтверждают, что предложенная методика обеспечивает формирование воспроизводимых, структурно согласованных и параметрически управляемых LiDAR-данных, пригодных для обучения и валидации алгоритмов обработки облаков точек. Разработанный подход может применяться в задачах цифрового моделирования промышленных объектов, построения BIM-моделей, мониторинга инфраструктуры и создания цифровых двойников.

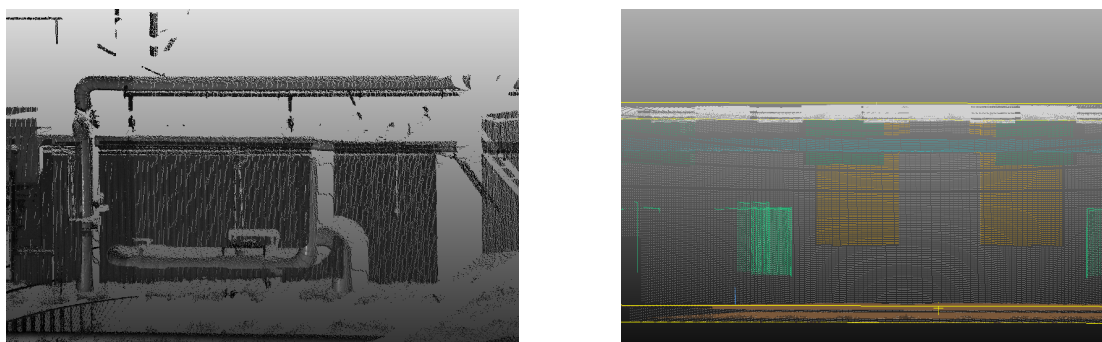


Рис. 1. Сравнение реального и синтетического LiDAR-облака промышленного объекта

Благодарности

Исследование проводилось при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № LAB-24.1/2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Optimal Placement of Laser Scanning Stations for Organizing Work on Three-Dimensional Identification of Objects in Space / D. Gura, R. Dyachenko, S. Yarutin, A. Makaryan // Lecture Notes in Networks and Systems : Advances in Interdisciplinary Approaches for Complex Problem Solving,

- Krasnoyarsk, 02–04 декабря 2024 года. – Krasnoyarsk: Springer Nature, 2025. – P. 518-527. – DOI 10.1007/978-3-031-95649-2_45. – EDN ZVWDSX.
2. Ruizhongtai Qi, Charles & Su, Hao & Mo, Kaichun & Guibas, Leonidas. (2016). PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation. 10.48550/arXiv.1612.00593.
 3. Hackel, T. & Savinov, Nikolay & Ladicky, L. & Wegner, J. & Schindler, Konrad & Pollefeys, Marc. (2017). SEMANTIC3D.NET: A NEW LARGE-SCALE POINT CLOUD CLASSIFICATION BENCHMARK. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. IV-1/W1. 91-98. 10.5194/isprs-annals-IV-1-W1-91-2017.
 4. Гайдамака, К. И. Применение алгоритмов машинного обучения в задачах контроля качества требований / К. И. Гайдамака // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2023. – № 1. – С. 87-96. – DOI 10.14357/20718632230109. – EDN OXNYSX.
 5. Димитриенко, Ю. И. Разработка генератора тетраэдральных сеток на основе триангуляции Делоне с ограничениями / Ю. И. Димитриенко, И. О. Богданов // Информационные технологии. – 2023. – Т. 29, № 5. – С. 257-266. – DOI 10.17587/it.29.257-266. – EDN НКYYNP.
 6. Методика построения оптимального маршрута при проведении работ по сканированию территории / Д. А. Гура, Р. А. Дьяченко, С. А. Ярутин, А. С. Макарян // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2025. – Т. 30, № 5. – С. 89-100. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-5-89-100. – EDN IUGKJH.
 7. Armeni, Iro & He, Zhi-Yang & Zamir, Amir & Gwak, Junyoung & Malik, Jitendra & Fischer, Martin & Savarese, Silvio. (2019). 3D Scene Graph: A Structure for Unified Semantics, 3D Space, and Camera. 5663-5672. 10.1109/ICCV.2019.00576.
 8. Ros, German & Sellart, Laura & Materzynska, Joanna & Vázquez, David & López, Antonio. (2016). The SYNTHIA Dataset: A Large Collection of Synthetic Images for Semantic Segmentation of Urban Scenes. 3234-3243. 10.1109/CVPR.2016.352.
 9. Richter, Stephan & Vineet, Vibhav & Roth, Stefan & Koltun, Vladlen. (2016). Playing for Data: Ground Truth from Computer Games. LNCS. 9906. 10.1007/978-3-319-46475-6_7.
 10. Random Number Generation and Monte Carlo Methods Gentle J. E. Random Number Generation and Monte Carlo Methods. 2nd ed. New York: Springer, 2003. 382 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/b97336>.
 11. Алтынцев, М. А. Особенности построения трехмерных метрических моделей по данным лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, П. А. Карпик // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 113-122. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-4-1-113-122. – EDN OFYQJV.
 12. Armeni, Iro & Sener, Ozan & Zamir, Amir & Jiang, Helen & Brilakis, Ioannis & Fischer, Martin & Savarese, Silvio. (2016). 3D Semantic Parsing of Large-Scale Indoor Spaces. 1534-1543. 10.1109/CVPR.2016.170.
 13. Wald, Johanna & Dhano, Helisa & Navab, Nassir & Tombari, Federico. (2020). Learning 3D Semantic Scene Graphs From 3D Indoor Reconstructions. 3960-3969. 10.1109/CVPR42600.2020.00402.
 14. Fisher, Matthew & Ritchie, Daniel & Savva, Manolis & Funkhouser, Thomas & Hanrahan, Pat. (2012). Example-based Synthesis of 3D Object Arrangements. ACM Transactions on Graphics (TOG). 31. 10.1145/2366145.2366154.
 15. Мультикритериальный подход к выбору параметров дискретизации для оптимального размещения станций наземного лазерного сканера / Д. А. Гура, Р. А. Дьяченко, С. А. Ярутин, Т. А. Тихонов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 211. – С. 458-474. – DOI 10.21515/1990-4665-211-038. – EDN EXIAKC.

© Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, С.А. Ярутин, Т.А. Тихонов, 2026

Р. А. Дьяченко¹, А. Н. Заколпина¹, С. А. Ярутин²✉

Подход к формированию данных лазерного сканирования городской застройки на основе синтетических сцен

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация

²Кубанский государственный технологический университет,
г. Краснодар, Российская Федерация
e-mail: yarutinsa@yandex.ru

Аннотация. Активное развитие методов дистанционного зондирования открывает новые возможности для анализа городской среды. Так в последние годы появилась потребность в автоматизированных системах и алгоритмах решений задач сегментации городской застройки, реконструкции фасадов зданий и построения цифровых двойников городской местности. Основным источником данных для решения перечисленных выше задач служат облака точек, которые получают методом наземного и воздушного лазерного сканирования. Однако внедрение алгоритмов лазерного сканирования осложняется такими факторами, как дефицит размеченных облаков точек городской среды, высокая стоимость полевого лазерного сканирования и ограниченная управляемость параметрами съемки (погода, освещенность, доступность объектов). В данной работе рассмотрен подход к формированию данных лазерного сканирования городской застройки на основе синтетических сцен.

Ключевые слова: лазерное сканирование, облака точек, городская среда, синтетические данные

R. A. Dyachenko^{1,2}, A. N. Zakolpina¹, S. A. Yarutin²✉

An approach to generating laser scanning data for urban development based on synthetic scenes

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Moscow, Russian Federation

²Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation
e-mail: yarutinsa@yandex.ru

Abstract. The rapid development of remote sensing methods is opening up new possibilities for analyzing urban environments. In recent years, the need has arisen for automated systems and algorithms for solving problems of urban development segmentation, reconstructing building facades, and constructing digital twins of urban areas. The primary source of data for solving these problems is point clouds obtained by terrestrial and airborne laser scanning. However, the implementation of laser scanning algorithms is complicated by factors such as the shortage of labeled urban point clouds, the high cost of field laser scanning, and limited control over survey parameters (weather, illumination, and object accessibility). This paper examines an approach to generating laser scanning data for urban development based on synthetic scenes.

Keywords: laser scanning, point clouds, urban environment, synthetic data

Введение

Активное развитие методов дистанционного зондирования открывает новые возможности для анализа городской среды. В последние годы возросла потребность в автоматизированных алгоритмах решения таких задач, как сегментация городской застройки, реконструкция фасадов зданий и построение цифровых двойников городов [1,2].

Основным источником данных для перечисленных задач служат облака точек, полученные методами наземного и воздушного лазерного сканирования [3]. Однако широкое внедрение алгоритмов обработки сдерживается рядом фундаментальных проблем:

- дефицит размеченных облаков точек городской среды – аннотация реальных данных требует значительных трудозатрат экспертов [4];
- высокая стоимость полевого лазерного сканирования – аренда оборудования, логистика, повторные съёмки [5];
- ограниченная управляемость параметрами съёмки – погодные условия, освещённость, доступность объектов, окклюзии.
- В связи с этим перспективным направлением становится использование синтетических данных, генерируемых в виртуальных средах с учётом физических моделей работы LiDAR-сканеров [6, 7]. Такой подход позволяет:
 - получать данные с идеальной семантической разметкой «из коробки»;
 - варьировать параметры сцены и сканирования в широких пределах;
 - моделировать редкие или опасные сценарии без полевых работ.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Проанализировать особенности облаков точек городской среды (фасады, дороги, инфраструктура).
2. Сформировать параметрическую модель городской сцены.
3. Разработать метод процедурной генерации экстерьеров городской застройки.
4. Реализовать имитацию процесса лазерного сканирования с использованием Blensor.
5. Сгенерировать размеченные облака точек и оценить их применимость для обучения алгоритмов.

Разработка и применение подобного подхода позволит автоматизировать процесс сбора данных, возможность генерации датасетов под конкретные задачи, применение в обучении моделей сегментации и тестировании алгоритмов.

Методы и материалы

Генерация синтетических городских сцен выполнялась в среде трёхмерного моделирования Blender 2.79 с использованием языка программирования Python для автоматизации процедурного моделирования.

Таблица 1. Архитектура параметрической модели

Компонент	Параметры генерации	Диапазон значений
Здания	Этажность, форма плана, геометрия фасадов, текстуры	1–30 этажей; прямоугольные, Г-образные, сложные конфигурации
Улично-дорожная сеть	Ширина проезжей части, тип покрытия, наличие тротуаров	8–40 м; асфальт, брусчатка, грунт
Инфраструктура	Тип и плотность размещения (фонари, знаки, скамейки)	5–50 объектов/км ²
Растительность	Вид, высота, плотность крон	Деревья, кустарники; 1–20 м

Процедурная генерация реализована через набор модульных скриптов, позволяющих варьировать параметры сцены через конфигурационные файлы формата JSON. Это обеспечивает массовое создание разнообразных вариантов застройки без ручной доработки

Для обеспечения максимального покрытия сцены при минимальном числе позиций сканирования разработан эвристический алгоритм выбора точек обзора.

Имитация работы LiDAR-сканера выполнялась с использованием дополнения Blensor 1.0.18, интегрированного в Blender.

Таблица 2. Настроенные параметры сканера

Параметр	Значение	Обоснование
Тип сканера	Velodyne HDL	Моделирование съёмки с движущейся платформы
Угол обзора	360°	Соответствует характеристикам коммерческих сканеров
Максимальная дальность	100 м	Ограничение для городских условий
Плотность лучей	0,05°	Баланс между детализацией и объёмом данных
Шум измерений	$\sigma = 1\text{ см}$ (гауссов)	Учёт инструментальной погрешности

Неоднородность плотности: учёт угловой зависимости разрешения сканера.

Для каждой сгенерированной сцены и выбранного набора позиций сканирования выполнялось:

1. Последовательное «сканирование» сценария в Blensor;
 2. Объединение полученных фрагментов облаков точек в единый датасет.
- Форматы экспорта:
- PLY/XYZ – облака точек с координатами и интенсивностью;
 - CSV – таблица соответствия «точка → класс»;
 - JSON – метаданные сцены (параметры генерации, позиции сканера).

Разработка выполнена на Python 3.10 с использованием:

- Blender API – для управления сценой и экспорта данных;
- Blensor – для симуляции сканирования.

Результаты и обсуждение

Разработанный вычислительный конвейер позволил сформировать открытый синтетический датасет, состоящий из набора уникальных сцен с контролируемым варьированием плотности и типологии застройки.

Пространственное распределение точек характеризуется умеренной гетерогенностью, обусловленной различиями в площади сцен и плотности объектов, и демонстрирует ожидаемое убывание плотности с увеличением дистанции до позиции сканирования, что полностью согласуется с физической моделью углового разрешения LiDAR-систем и подтверждает корректность реализованной симуляции.

Геометрический анализ облаков точек выявил логнормальный характер распределения расстояний до ближайших соседей, типичный для нерегулярных пространственных структур, а также минимальную долю изолированных точек, свидетельствующую о низком уровне артефактов генерации.

Важным результатом исследования стала автоматизированная процедура семантической разметки на уровне отдельных точек с использованием таксономии из шести классов городской среды, обеспечивающая точность, внутреннюю согласованность и детальность аннотации, превосходящие возможности ручной разметки.

Наблюдаемый дисбаланс классов отражает реальную морфологию городских пространств с преобладанием вертикальных и горизонтальных поверхностей и может быть компенсирован на этапе обучения нейросетевых моделей посредством взвешивания функции потерь. Высокая вариативность генерируемых сцен обеспечена на морфологическом уровне за счёт охвата четырёх основных типов городской застройки, статистически различающихся по плотности и высоте, что гарантирует репрезентативность датасета для обучения алгоритмов, устойчивых к структурному разнообразию среды.

Визуальный и количественный анализ показывает, что синтетические облака воспроизводят ключевые структурные и статистические свойства реальных данных. Незначительное расхождение в распределении шумов объясняется упрощённой моделью атмосферных эффектов (дождь, туман, аэрозоль), которые не учитывались в текущей версии симулятора. Тем не менее, наблюдаемое сходство подтверждает пригодность сгенерированных данных для обучения и тестирования алгоритмов 3D-компьютерного зрения.

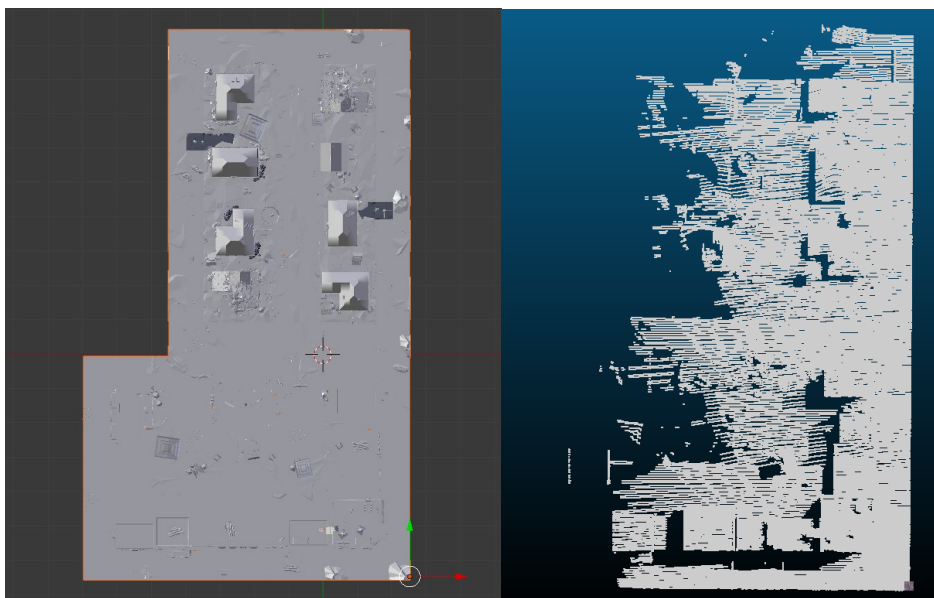


Рис. 1. Трёхмерная модель городской сцены, сгенерированная в среде Blender (слева), и соответствующее синтетическое облако точек, полученное при моделировании лазерного сканирования (справа, проекция сверху)

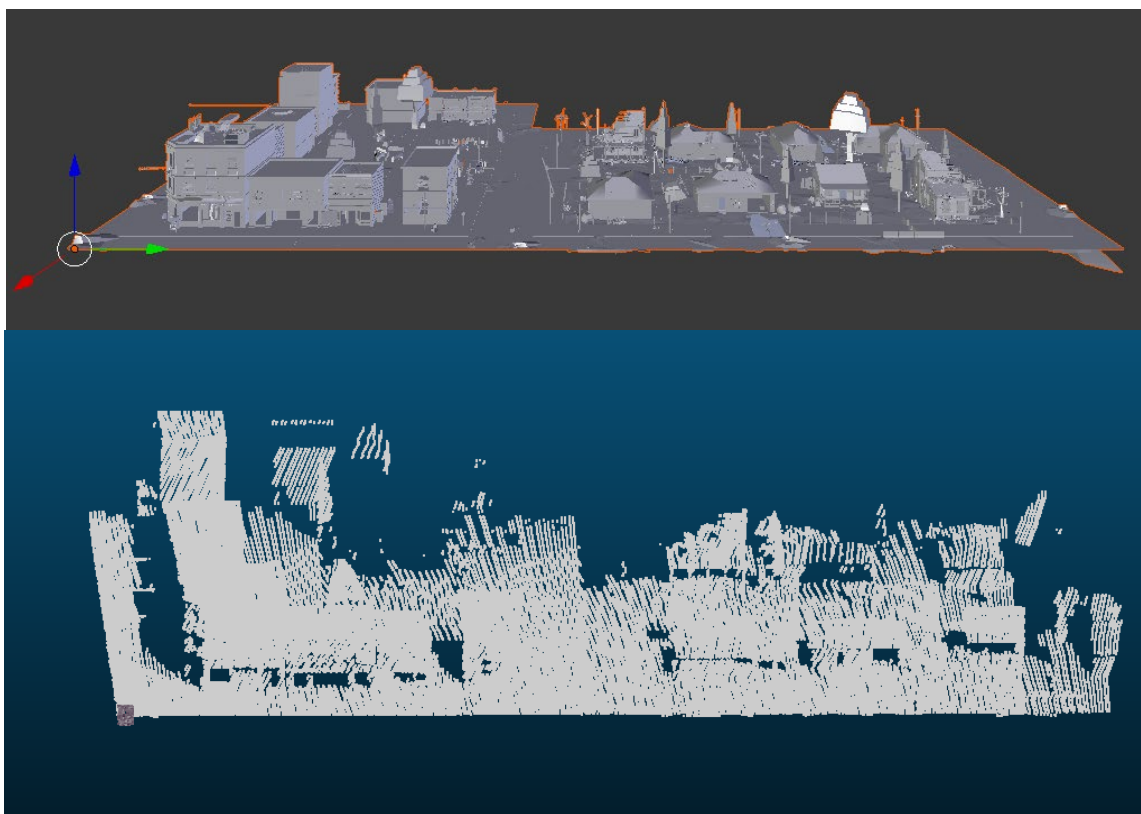


Рис. 2. Трёхмерная модель городской сцены, сгенерированная в среде Blender (вверху), и соответствующее синтетическое облако точек, полученное при моделировании лазерного сканирования (снизу, проекция сбоку)

Ожидается существенный выигрыш в обобщающей способности и устойчивости нейросетевых моделей за счёт явного учёта гауссовской природы пространственных вариаций и инструментальных погрешностей LiDAR-сканеров. Моделирование стохастического шума, отклонений геометрии точек и локальных флуктуаций плотности на основе гауссовских распределений позволяет синтетическим данным статистически аппроксимировать реальные измерительные процессы, что снижает диссонанс между искусственной и натурной выборками. Кроме того, интеграция гауссовских механизмов в процедуру генерации сцен обеспечивает непрерывное и плавное покрытие пространства признаков, предотвращая формирование дискретных артефактов и снижая риск переобучения на ограниченных синтетических паттернах. В совокупности данный подход формирует обучающее множество, распределение характеристик которого асимптотически согласуется с реальными городскими облаками точек, что предопределяет повышение точности семантической сегментации, детекции объектов и геометрического восстановления при последующем переносе алгоритмов на натурные данные.

Заключение

В данной работе предложен комплексный подход к формированию данных лазерного сканирования городской застройки на основе синтетических сцен. Основные результаты исследования могут быть сформулированы следующим образом:

1. Разработана параметрическая модель городской среды, обеспечивающая автоматизированную генерацию сцен с варьируемой плотностью, этажностью и геометрией застройки. Интеграция семантической разметки на уровне меш-объектов исключает необходимость ручной аннотации облаков точек.
2. Предложенный гибридный алгоритм обеспечивает высокое покрытие контрольных поверхностей при сокращении числа позиций по сравнению с традиционными стратегиями размещения.
3. Реализована физически обоснованная имитация LiDAR-сканирования в среде *Blensor* с учётом инструментального шума, окклюзий, неоднородности плотности [8]. Сгенерированные облака точек статистически сопоставимы с реальными данными, что подтверждается метриками распределения расстояний, нормалей и интенсивности.
4. Сформирован размеченный синтетический датасет (5 сцен), пригодный для обучения и валидации алгоритмов 3D-компьютерного зрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yu D., Fang C. Urban remote sensing with spatial big data: A review and renewed perspective of urban studies in recent decades //Remote Sensing. – 2023. – Т. 15. – №. 5. – С. 1307.
2. Pu S., Vosselman G. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2009. – Т. 64. – №. 6. – С. 575-584.
3. Biljecki F. et al. Applications of 3D city models: State of the art review //ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2015. – Т. 4. – №. 4. – С. 2842-2889.

4. Behley J. et al. Semantickitti: A dataset for semantic scene understanding of lidar sequences //Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. – 2019. – С. 9297-9307.
5. Vaaja M. T. Feasibility of mobile laser scanning for mapping and monitoring a riverine environment. – 2014.
6. Wang R., Peethambaran J., Chen D. Lidar point clouds to 3-D urban models \$: \$ A review //IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2018. – Т. 11. – №. 2. – С. 606-627.
7. Gschwandtner M. et al. BlenSor: Blender sensor simulation toolbox //International Symposium on Visual Computing. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. – С. 199-208.
8. Optimal Placement of Laser Scanning Stations for Organizing Work on Three-Dimensional Identification of Objects in Space / D. Gura, R. Dyachenko, S. Yarutin, A. Makaryan // Lecture Notes in Networks and Systems : Advances in Interdisciplinary Approaches for Complex Problem Solving, Krasnoyarsk, 02–04 декабря 2024 года. – Krasnoyarsk: Springer Nature, 2025. – P. 518-527. – DOI 10.1007/978-3-031-95649-2_45. – EDN ZVWDSX.

© Р. А. Дьяченко, А. Н. Заколпина, С. А. Ярутин, 2026

А. Ю. Мельничук¹, М. А. Баширов¹✉

Технология обработки космических снимков с идентификацией неиспользуемых сельскохозяйственных земель

¹Институт «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, Российская Федерация
e-mail: bashirov_m@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается технология машинного обучения для распознавания неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения на примере спутниковых снимков европейской программы Sentinel-2 полученных из открытых источников. В процессе обучения нейронная сеть последовательно адаптировала внутренние параметры под решаемую задачу. При построении модели учитывались региональные закономерности вегетационных процессов. Полученные в ходе применения разработанной модели результаты использованы для оценки неиспользуемых земель.

Ключевые слова: ввод земель в оборот, неиспользуемые сельскохозяйственные земли, автоматизированное выявление, дистанционное зондирование, машинное обучение, спутниковые данные

A. Yu. Melnichuk¹, M. A. Bashirov¹✉

Technology for processing satellite images with identification of unused agricultural lands

¹Institute «Agrotechnological Academy» of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «V.I. Vernadsky Crimean Federal University»,
Simferopol, Russian Federation
e-mail: bashirov_m@mail.ru

Abstract. The article discusses a machine learning technology for recognizing unused agricultural lands using satellite images from the European Sentinel-2 program obtained from open sources. During the training process, the neural network consistently adapted its internal parameters to the task at hand. Regional patterns of vegetation processes were taken into account when building the model. The results obtained from applying the developed model were used to assess unused agricultural lands.

Keywords: bringing agricultural land into use, unused agricultural lands, automated detection, remote sensing, machine learning, satellite data

Введение

Согласно официальным сведениям, масштаб неиспользуемых сельскохозяйственных угодий в регионе остаётся весьма ощутимым. Около 170 тыс. гектаров земель аграрного назначения не задействованы по прямому назначению, что составляет 19% от общей площади сельскохозяйственных угодий Республики Крым [1]. Из них около 60 тыс. га отнесены к первоочередным для вовлечения в хозяйственный оборот, тогда как ещё 64 тыс. га допускается вернуть в производственный

цикл при условии проведения культуртехнических работ [2, 3]. Отдельную категорию образуют не востребованные земельные доли площадью свыше 19 тыс. га: с 2025 года их переход в муниципальную собственность осуществляется в упрощённом порядке.

За десятилетний период – с 2014 по 2024 год – площадь активно эксплуатируемых сельскохозяйственных земель в Крыму увеличилась с 530 тыс. га до 830 тыс. га. Что касается заброшенных угодий, к ноябрю 2025 года из общего массива в 44 тыс. га около 39 тыс. га уже возвращены в муниципальную собственность.

Технология идентификации неиспользуемых сельскохозяйственных земель по космическим снимкам – это многоэтапный процесс, который объединяет анализ спектральных характеристик растительности, временные ряды данных и математические модели.

Геоинформационная диагностика служит одним из ключевых инструментов контроля за состоянием сельскохозяйственных угодий, где данные дистанционного зондирования Земли выступают главным источником пространственной информации, охватывающей обширные площади. Материалы съёмки со спутников Sentinel, Landsat и ряда аналогичных платформ обеспечивают достаточное разрешение для формирования изображений земной поверхности по различным сочетаниям спектральных каналов. На основе этих данных рассчитывается вегетационный индекс NDVI, применение которого позволяет выявлять дешифровочные признаки неиспользуемых сельскохозяйственных земель и устанавливать период их выведения из оборота [4, 5, 6, 7].

Выявление неиспользуемых сельскохозяйственных угодий по данным дистанционного зондирования строится на алгоритмах машинного обучения, способных в автоматическом режиме распознавать диагностические признаки таких территорий. Спутниковые данные при этом трансформируются в рабочий инструмент, пригодный для возврата неиспользуемых земель в сельскохозяйственный оборот. Переход от классических аналитических методов к высокоавтоматизированным системам на базе искусственного интеллекта (ИИ) позволит превращать спутниковые данные в практический инструмент для вовлечения неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения в оборот.

Мониторинг небольших контуров сельскохозяйственных угодий нередко строится на сочетании нескольких методов, среди которых аэрофотосъёмка с использованием БПЛА, оснащённых мультиспектральными камерами, позволяет получать детализированные данные об отдельных участках. Для установления правообладателей земельных участков используются кадастровые данные.

Целью данной статьи является разработка методики, позволяющей распознавать посевы сельскохозяйственных культур и выявлять земли сельскохозяйственного назначения, выведенные из оборота. При построении модели учитывались региональные закономерности вегетационных процессов. Полученные в ходе применения разработанной модели результаты использованы для оценки неиспользуемых земель.

Методы и материалы

Пространственный анализ выполнялся в геоинформационной системе QGIS – программном обеспечении с открытым исходным кодом, рассчитанном на работу с большими массивами геоданных. Спутниковые снимки европейской программы Sentinel-2 послужили основой дистанционного мониторинга: данные этой системы отличаются регулярностью получения и пространственным разрешением 10 м/пиксель [8]. Для более детального анализа применяются коммерческие снимки высокого и сверхвысокого разрешения (от 2 до 10 метров, а иногда и выше) [9].

Подготовка спутниковых материалов к анализу предполагала несколько последовательных процедур. Радиометрическая и атмосферная коррекция устраняла искажения, связанные с условиями съёмки, после чего из массива исключались участки, затронутые облачностью и тенями от неё. Приведённые к единому формату данные разбивались на небольшие фрагменты, пригодные для формирования обучающей выборки.

Выявление неиспользуемых угодий строится на сопоставлении характеристик конкретного участка с некоторым эталонным состоянием – задача, которую берёт на себя обученная модель: нейронная сеть либо иной алгоритм машинного обучения. Ключевыми диагностическими признаками служат состав и характер растительного покрова (присутствие сорных и древесно-кустарниковых видов) [10], отсутствие следов механической обработки почвы, а также визуально фиксируемые изменения структуры и колористики поля относительно активно возделываемых территорий. Именно на различении подобных паттернов и строится обучение модели: алгоритм осваивает разграничение неиспользуемых площадей и иных категорий земель. Применение такого подхода сокращает временные затраты на анализ и одновременно устраняет влияние субъективных оценок [11].

При машинном обучении алгоритмы – в частности, метод случайного леса (Random Forest) – проходят обучение на размеченных снимках, где статус каждого поля (используемое либо заброшенное) заранее установлен, после чего модель самостоятельно классифицирует полученные закономерности на новые территории. Достижимая при этом точность категоризации составляет порядка 92% [8].

На стадии обучения нейронная сеть последовательно адаптирует внутренние параметры под решаемую задачу. Работа ведётся с размеченными наборами данных: каждому пикселю или фрагменту снимка присваивается определённая категория – обрабатываемое поле, заброшенный участок, лесной массив. Итеративный характер процесса многократно «прогоняет» обучающие примеры, в ходе которого веса модели корректируются так, чтобы расхождение между получаемым прогнозом и эталонной разметкой последовательно сокращалось [12].

Получаемый нейросетью выходной результат – в частности, пиксельная маска – как правило содержит шумовые артефакты и случайные выбросы, требующие устранения. Верификация представляет собой завершающую процедуру: эксперты-дешифровщики выборочно проверяют полученные данные, подтверждая их достоверность.

Нейросетевые технологии в данном контексте выполняют функцию, выходящую за рамки простой фиксации нарушений: на их основе, формируются управленческие решения регионального масштаба, направленные на возвращение деградированных угодий в сельскохозяйственный оборот.

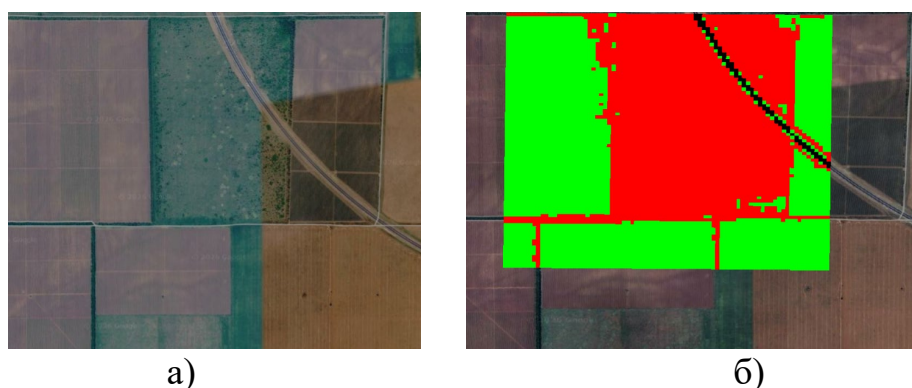


Рис. 1. Результат машинного распознавания неиспользуемого участка земель сельскохозяйственного назначения

а) исходный файл, б) фрагмент полученный в результате автоматического распознавания

Заключение

Нейросетевые сервисы способны за короткое время обрабатывать значительные объёмы данных, достигая точности классификации участков до 95%, однако результат напрямую зависит от качества обучающих выборок. Верификация полученных данных осуществляется методом визуального дешифрирования – оно позволяет сформировать целостное представление об исследуемой территории, но предъявляет высокие требования к квалификации специалистов и сопряжено со значительными трудозатратами.

Авторами разработаны и проверены на практике подходы к формированию региональных образцов – как освоенных, так и неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения. Такие эталоны позволят в автоматическом режиме фиксировать территории, где динамика растительного покрова выходит за пределы характерных значений: отклонение от типичной картины вегетации служит одним из диагностических признаков фактического неиспользования угодий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Более 170 тысяч га сельскохозяйственных земель не используется в Крыму – Текст: электронный: <https://c-pravda.ru/news/2024-11-15/bolee-170-tysyach-ga-selskokhozyajstvennykh-zemel-ne-ispolzuetsya-v-krymu> (дата обращения 15.05.2026).
2. В Крыму насчитывается больше 170 тысяч гектаров неиспользуемых сельхозземель – Текст: <https://www.crimea.kp.ru/online/news/6091473/> (дата обращения 15.05.2026).
3. В Крыму не используется порядка 19% сельхозземель – Текст: <https://kvedomosti.ru/?p=1163842#respond> (дата обращения 15.05.2026).
4. Терехин Э. А. Особенности многолетней динамики вегетационного индекса залежных земель на территории Центрального Черноземья // Региональные геосистемы. – 2021. Т. 45, № 4. С. 505–515. Текст : непосредственный.

5. Выявление разновозрастных залежей на эрозионно-опасных территориях юга Западной Сибири с применением геоинформационных технологий / Е. А. Сайб [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. Т. 17, № 4. С. 129–136. Текст : непосредственный.
6. Дергунов А. В., Краснощек К. В., Трубников Ю. Н. и др. Геоинформационная диагностика залежных земель Зареченского стационара ФИЦ КНЦ СО РАН методами ДЗЗ // Проблемы плодородия почв в современном земледелии. Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН. – 2024. С. 408–412. DOI: 10.52686/9785605087878_408 – Текст: https://www.ebsvkr.ru/ru/nauka/conference_article/12276/view (дата обращения: 15.05.2026).
7. Трубников Ю. Н., Дергунов А. В., Краснощек К. В. и др. Диагностика залежных земель и агроценозов методами дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий // Вестник КрасГАУ. 2024. № 5. С. 108–115. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-5-108-115> Текст : непосредственный.
8. Дубровин К. Н., Илларионова Л. В., Степанов А. С. Решение задач идентификации сельскохозяйственных культур и актуализации границ сельскохозяйственных полей (на примере Хабаровского муниципального района) // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 1. – С. 48–58. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-48-58 Текст : непосредственный.
9. Применение спутниковых данных для муниципального контроля и мониторинга вовлечения неиспользуемых сельскохозяйственных земель – Текст: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=338&thesis=10990> (дата обращения: 15.05.2026).
10. «Поехали!» Космические технологии на службе Россельхознадзора – Текст: <https://69.fsvps.gov.ru/news/poehali-kosmicheskie-tehnologii-na-sluzhbe-rosselkhoznadzora/> (дата обращения: 15.05.2026).
11. Ладанова Е. О., Никулин В. В. Апробация нейросетевых моделей при решении проектно-ориентированных задач анализа земель // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2025, № 2, С. 51–59 Текст : непосредственный.
12. Agricultural Fields Segmentation on Satellite Images Using Convolutional Neural Networks / Larionov R., Kotov N., Priorov A., Semenov A. // 2021 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2021 - Proceedings. – 2021.

© А. Ю. Мельничук, М. А. Баширов, 2026

И. В. Овсянников^{1,2✉}, С. А. Рылов¹

Веб-сервис мониторинга атмосферных осадков по данным камер видеонаблюдения на основе глубокого обучения

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: i.ovsyannikov@ict.nsc.ru

Аннотация. Рассматривается задача оперативного мониторинга атмосферных осадков в городской среде по видеопотокам сети камер наружного видеонаблюдения. Предложен веб-сервис, реализующий сервисно-ориентированную архитектуру и предоставляющий пользователю агрегированную картину осадков на интерактивной карте. В качестве классификатора применена свёрточная нейронная сеть MobileNetV3-Large, дообученная методом контрастного самообучения SimCLR. Для агрегированного представления зон выпадения осадков предложен алгоритм построения «облаков» осадков на основе кластеризации DBSCAN и мягкого расширения выпуклой оболочки. Приведены значения качества классификации и эксплуатационные характеристики системы, обслуживающей более 1 300 действующих камер.

Ключевые слова: мониторинг атмосферных осадков, камеры видеонаблюдения, глубокое обучение, веб-сервис, классификация изображений, MobileNetV3

I. V. Ovsyannikov^{1,2✉}, S. A. Rylov¹

A web service for atmospheric precipitation monitoring from CCTV cameras based on deep learning

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: i.ovsyannikov@ict.nsc.ru

Abstract. This paper addresses real-time atmospheric precipitation monitoring in urban environments based on video streams from a network of outdoor surveillance cameras. We propose a service-oriented web application that presents the user with an aggregated precipitation map on an interactive map. The classifier is a MobileNetV3-Large convolutional neural network, fine-tuned with the SimCLR contrastive self-supervised learning method. To present precipitation areas in aggregated form, we propose an algorithm for constructing precipitation "clouds" based on DBSCAN clustering and soft expansion of the convex hull. We report the classification quality and the operational characteristics of the system, which serves more than 1 300 active cameras.

Keywords: atmospheric precipitation monitoring, CCTV cameras, deep learning, web service, image classification, MobileNetV3

Введение

Краткосрочное прогнозирование осадков и оперативное информирование о фактических условиях остаются актуальными задачами муниципального управле-

ния и метеорологии. Сеть автоматических метеостанций обеспечивает высокое качество точечных измерений, однако её пространственное покрытие ограничено. Сети городских камер видеонаблюдения охватывают тысячи точек в режиме непрерывной трансляции и могут рассматриваться как естественный источник данных для распределённого визуального мониторинга атмосферных явлений [1].

В работах последних лет показано, что современные свёрточные нейронные сети устойчиво распознают атмосферные осадки по отдельным кадрам с уличных камер, существенно превосходя классические подходы машинного обучения, например, основанные на признаках HOG [2]. Однако в большинстве известных исследований акцент сделан на алгоритме классификации, тогда как задача построения программного комплекса, обеспечивающего непрерывную обработку сети из тысяч камер и построение агрегированной карты осадков, освещена существенно слабее.

В предшествующей работе авторов [3] был предложен метод автоматической детекции осадков по видеопотокам уличных камер на основе свёрточных нейронных сетей. Настоящая работа развивает это направление и фокусируется на программном комплексе, реализующем такой метод в форме веб-сервиса. Целью работы является разработка и опытная эксплуатация веб-сервиса мониторинга атмосферных осадков.

Методы и материалы

Программный комплекс организован как набор взаимодействующих сервисов. Высокоуровневая архитектура комплекса представлена на рис. 1.

В составе комплекса выделены сервис прикладного интерфейса, сервис фоновой обработки камер, сервис проверки доступности камер, хранилища данных и подсистема мониторинга.

Сервис прикладного интерфейса предоставляет возможности классификации произвольного изображения, получения списка активных камер с актуальными предсказаниями, выдачи последнего обработанного кадра для конкретной камеры и принудительного запуска полного цикла её обработки.

Сервис фоновой обработки последовательно обрабатывает все активные камеры под управлением планировщика. Полный цикл обработки одной камеры включает захват короткой последовательности кадров с видеопотока, прогон каждого кадра через классификатор, агрегацию распределений вероятностей оператором минимума и выбор представительного кадра. Параллельно запрашивается метеосводка у внешнего сервиса OpenWeatherMap. Кадр и обновлённое распределение классов сохраняются в объектное хранилище и базу данных; при метке «дождь» или «снег» событие дополнительно фиксируется в таблице подтверждённых осадков.

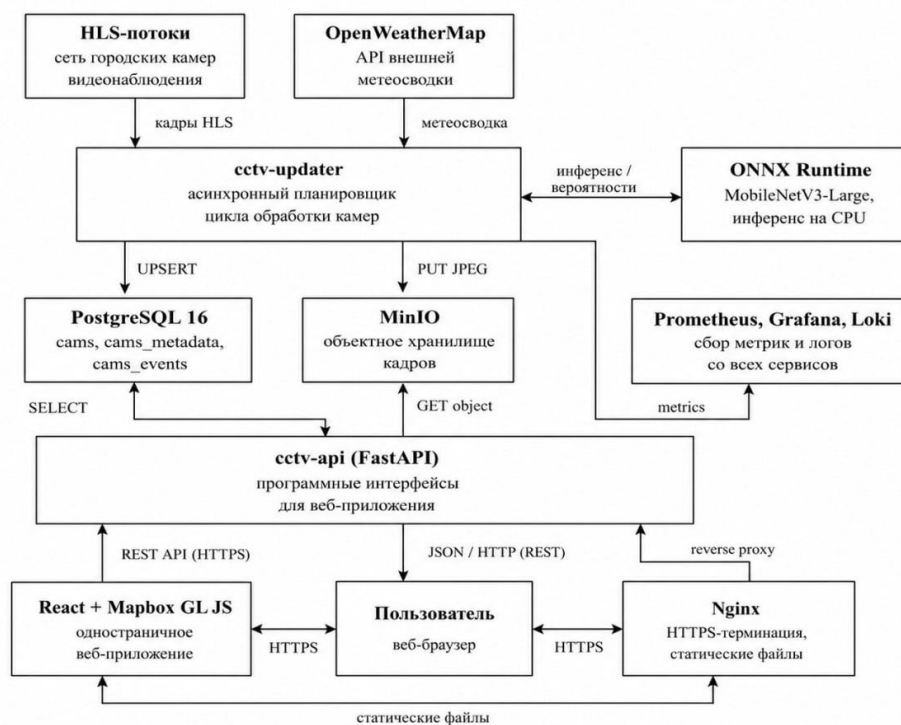


Рис. 1. Архитектура веб-сервиса: сервис прикладного интерфейса, сервис фоновой обработки камер, хранилища и подсистема наблюдаемости

В качестве классификатора используется свёрточная нейронная сеть MobileNetV3-Large [4], дополнительно дообученная методом контрастного самообучения SimCLR [5] на корпусе из более чем 300 тыс. размеченных кадров уличных камер. Подбор гиперпараметров выполнен с помощью библиотеки Optuna [6]. Финальная модель экспортируется в формат ONNX и выполняется на центральном процессоре, что упрощает развёртывание. На выходе сети формируется распределение вероятностей по трём классам – отсутствие осадков, дождь и снег.

Для агрегированного представления зон осадков предложен алгоритм построения «облаков» дождя и снега. Для каждого класса по координатам камер с активной меткой выполняется плотностная кластеризация алгоритмом DBSCAN [7]; кластеры с числом камер менее трёх исключаются. Для каждого оставшегося кластера строится минимальная выпуклая оболочка алгоритмом Грэхэма [8] и мягко расширяется на величину, пропорциональную среднему расстоянию между ближайшими соседями. Алгоритм выполняется на стороне клиента при каждом обновлении списка камер.

Результаты

Веб-приложение реализовано как одностраничное приложение. На карту нанесены маркеры всех активных камер; на малом масштабе соседние маркеры объединяются в кластеры. Каждый маркер отрисовывается в зависимости от класса с наибольшей вероятностью: нейтральная пиктограмма при отсутствии

осадков, капля воды при дожде и снежинка при снеге. Боковое меню фильтров позволяет включать и отключать классы, переключаться между режимами «карта» и «глобус», управлять отображением «облаков» осадков и регулировать минимальное расстояние между объединяемыми маркерами.

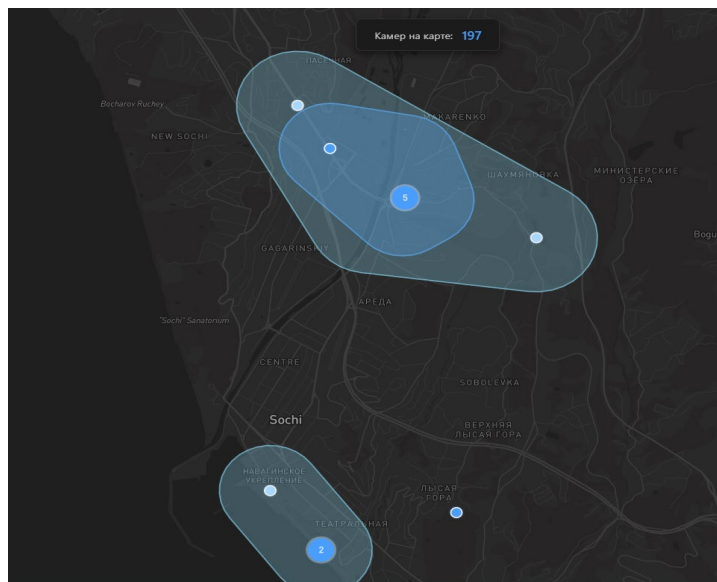


Рис. 2. Агрегированный слой «облаков» осадков на интерактивной карте

Обсуждение

Полученные результаты согласуются с тенденцией, наблюдаемой в ряде современных работ по визуальному распознаванию погодных условий: качественный прирост достигается не столько за счёт выбора отдельной архитектуры классификатора, сколько за счёт комбинации тщательного формирования датасета, контрастного самообучения и автоматического подбора гиперпараметров.

Анализ ошибок итоговой модели показывает, что доминирующая часть промахов сосредоточена в нескольких систематических сценариях: мокрая дорога без активного дождя, лежащий снег без снегопада, ночные сцены с интенсивным точечным освещением, капли и засохшие потёки на линзе камеры, а также сезонные явления, не связанные с осадками. Указанные сценарии представляют собой естественные направления дальнейших исследований: для их корректной обработки потребуются дополнительная аугментация обучающей выборки, специфичная для ночных условий, и адаптивные алгоритмы исключения «плохих» камер. На сегодняшний день эти сценарии частично купируются стадией двойной верификации событий осадков с применением большой визуально-языковой модели в роли валидатора.

Заключение

В работе предложен и реализован в форме веб-сервиса подход к мониторингу атмосферных осадков по данным сети действующих городских камер наружного видеонаблюдения. Программный комплекс реализован как набор взаимодействующих сервисов, выполняет полный цикл обработки более чем 1 300 камер и достигает F1-меры классификации осадков 0,889. Существенным элементом сервиса является пользовательский веб-интерфейс, предоставляющий интерактивную карту камер, а также алгоритм агрегации меток в пространственные «облака» осадков.

Действующая система развёрнута на сервере ФИЦ ИВТ и открыто доступна для использования [9-10]. Дальнейшее развитие системы видится в расширении сети подключённых источников видеоданных, включении дополнительных классов погодных явлений, а также в интеграции выходных меток сервиса с локальными системами краткосрочного прогноза погоды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fiallos-Salguero M., Khu S.-T., Guan J., Wang T., Wang M. Computer Vision-Based Method for Rainfall Estimation Using CCTV Cameras and Smartphone Videos // 15th International Conference on Hydroinformatics. – 2024. – P. 284.
2. Wang X., Zhao K., Huang H., Zhou A., Chen H. Surveillance camera-based deep learning framework for high-resolution near surface precipitation type observation // Atmospheric Measurement Techniques. – 2025. – Vol. 18. – P. 5457-5484. – DOI: 10.5194/amt-18-5457-2025.
3. Овсянников И. В., Рылов С. А. Использование камер наружного видеонаблюдения для мониторинга осадков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2025. – Т. 4. – С. 40-45.
4. Howard A., Sandler M., Chu G., Chen L.-C., Chen B., Tan M., Wang W., Zhu Y., Pang R., Vasudevan V., Le Q. V., Adam H. Searching for MobileNetV3 // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2019. – P. 1314-1324.

5. Chen T., Kornblith S., Norouzi M., Hinton G. A simple framework for contrastive learning of visual representations // Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning, PMLR. – 2020. – Vol. 119. – P. 1597-1607.
6. Akiba T., Sano S., Yanase T., Ohta T., Koyama M. Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework // Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2019. – P. 2623-2631.
7. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). – 1996. – P. 226-231.
8. Graham R. L. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set // Information Processing Letters. – 1972. – Vol. 1, № 4. – P. 132-133.
9. Официальный сайт системы мониторинга атмосферных осадков CCTVForecast [Электронный ресурс]. URL: <https://cctvforecast.ru/> (дата обращения: 15.05.2026).
10. Овсянников И.В., Рылов С.А. Программа для автоматического сбора и анализа изображений с камер наружного видеонаблюдения с учетом метеорологических условий. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662455 от 21.05.2025 г.

© И. В. Овсянников, С. А. Рылов, 2026

М. Е. Сиденко^{1,2}, С. А. Рылов¹✉

Гибридный алгоритм выделения водной поверхности по спутниковым снимкам Sentinel-2 на основе глубокого обучения и кластерного анализа

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: RylovS@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача автоматического выделения водной поверхности на мультиспектральных спутниковых снимках Sentinel-2, в условиях паводковой ситуации и повышенной облачности. Показан качественный характер различий спектральных характеристик объектов в освещённых и теневых зонах сцены, что обосновывает необходимость их раздельной обработки при выделении водной поверхности. Предложен гибридный алгоритм, сочетающий предварительное маскирование облачности, плотностную кластеризацию по спектральным признакам и последующую классификацию кластеров методом случайного леса. В качестве признаков для кластеризации использовались спектральные индексы NDWI, NDVI и MNDWI. Для выделения облачности применялся алгоритм OmniCloudMask. Экспериментальная оценка на наборе данных WorldFloods показала высокое качество выделения водной поверхности как в ясных, так и в облачных зонах сцен.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, паводки, сегментация водной поверхности, кластеризация, случайный лес, спектральные индексы, Sentinel-2

М. Е. Sidenko^{1,2}, S. A. Rylov¹✉

A hybrid algorithm for water surface segmentation from Sentinel-2 satellite images using deep learning and cluster analysis

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: RylovS@mail.ru

Abstract. The paper considers the problem of automatic water surface segmentation on Sentinel-2 multispectral satellite imagery under flood conditions and heavy cloud coverage. Qualitative differences in the spectral characteristics of objects in illuminated and shadowed areas of a scene are demonstrated, which justifies their separate processing during water surface extraction. A hybrid algorithm combining preliminary cloud masking, density-based clustering of spectral features, and subsequent cluster classification using the Random Forest method is proposed. The spectral indices NDWI, NDVI, and MNDWI were used as clustering features. The OmniCloudMask algorithm was applied for cloud detection. Experimental evaluation on the WorldFloods dataset demonstrated high-quality water surface segmentation both in clear and cloud-covered areas of the scenes.

Keywords: remote sensing, floods, water surface segmentation, clustering, random forest, spectral indices, Sentinel-2

Введение

Полноценное решение задачи оперативного мониторинга паводковой ситуации невозможно без использования данных дистанционного зондирования Земли. Среди современных спутниковых систем оптического наблюдения особый интерес для задач картографирования паводков представляют аппараты серии Sentinel-2. Их широкое применение обусловлено сочетанием относительно высокого пространственного разрешения, регулярности съёмки, глобального покрытия и открытой доступности данных, что делает возможным оперативный анализ паводковой обстановки на больших территориях.

Задача выделения водной поверхности в условиях паводков существенно сложнее выделения границ постоянных водных объектов. Паводковая вода смешивается с растительностью и почвой, формируя спектрально неоднородные области [1]. Дополнительные сложности создают облачность, тени от облаков и рельефа местности, а также низкий контраст сцен в условиях плохой освещенности [2]. В результате водные объекты по своим спектральным характеристикам могут пересекаться с тенями, влажными почвами и затемнёнными участками поверхности, что приводит к ошибкам сегментации. Поэтому разработка алгоритма автоматического выделения воды, способного работать в сложных условиях, является актуальной задачей.

Целью исследования является разработка алгоритма автоматического выделения водной поверхности на спутниковых снимках Sentinel-2, способного работать в условиях паводков и повышенной облачности.

Материалы и методы

В качестве источника данных использовались мультиспектральные снимки аппарата Sentinel-2, с уровнем предобработки L1C, из открытого набора данных WorldFloods [3]. Набор содержит 509 сцен паводков различной сложности, включая случаи с повышенной облачностью, тенями от облаков и низким контрастом. В набор также включены маски воды и облаков для каждого снимка. Также Сибирским Центром «НИЦ «Планета» были предоставлены аннотации снимков разливов рек, сделанные аппаратами Sentinel-2 в количестве 10 штук, которые были использованы для визуальной оценки качества работы алгоритма.

Для исследования влияния теней от облаков на спектральные характеристики объектов на одном из снимков предоставленных «НИЦ «Планета» были вычислены средние значения спектральных признаков NIR и NDWI на границе освещенной и теневой зон. Полученные результаты показали наличие существенных различий спектральных характеристик объектов в освещённых и теневых областях сцены. Это обусловило необходимость предварительного выделения зон различной освещенности и их независимой обработки в составе создаваемого алгоритма. С этой целью применялся ансамблевый алгоритм глубокого обучения OmniCloudMask [4], формирующий маски четырех классов: освещенной зоны, плотных облаков, полупрозрачной облачности и теней от облаков.

В основе разработанного алгоритма лежит подход, основанный на предварительной кластеризации изображения с последующей классификацией полученных

кластеров на водные и неводные, что позволяет повысить устойчивость результатов и снизить влияние выбросов [5, 6]. Настоящая работа развивает подход, представленный авторами в [7], адаптируя его к условиям повышенной облачности.

Для кластеризации был выбран сеточный иерархический алгоритм НСА [6]. Он обладает высоким быстродействием и способен выделять вложенные кластеры сложной формы, что обеспечивает высокое качество кластеризации.

Для классификации полученных кластеров был выбран ансамблевый алгоритм случайного леса [8]. Благодаря обучению каждого дерева на случайном подмножестве признаков и объектов выборки, а также формированию итогового результата по принципу мажоритарного голосования всех обученных деревьев, алгоритм демонстрирует устойчивость к переобучению и выбросам, что критически важно при высокой изменчивости отражательной способности воды, характерных для паводков. В качестве программной реализации использовался класс `RandomForestClassifier` из библиотеки `sklearn` [9].

Общая схема предлагаемого алгоритма включает следующие этапы.

1. Подготовка данных – извлечение спектральных характеристик R, G, B, NIR, SWIR1, SWIR2 и спектральных индексов NDWI [10], NDVI, MNDWI [11].

2. Формирование масок облачности с помощью алгоритма `OmniCloudMask`. В качестве входных признаков используются каналы R, G, NIR.

3. Линейное растяжение признаков NDWI, NDVI, MNDWI с обрезкой 1 % значений с краев гистограммы. Растяжение производится независимо для каждой из 4 масок облачности, полученных от алгоритма `OmniCloudMask`.

4. Кластеризация алгоритмом НСА (гиперпараметры $m: 48$, $t: 0,99$) каждой из 4 зон снимка по отдельности.

5. Вычисление средних значений спектральных признаков R, G, B, NIR, SWIR1, SWIR2 для каждого полученного кластера.

6. Классификация кластеров алгоритмом случайного леса по вычисленным средним значениям спектральных признаков. Формирование полномасштабной карты предсказаний, содержащей 3 класса – вода, не вода и не валидная область.

7. Постобработка медианным фильтром с размером окна 5×5 для сглаживания резких выступов и фильтрации шума на итоговой карте.

Для обучения алгоритма классификации разработана следующая методика:

1. Для каждого снимка из обучающего набора `WorldFloods` производится кластеризация и расчет статистик кластеров по ранее описанным правилам.

2. Для каждого кластера вычисляется метрика «чистоты» (Purity), определяемая как доля пикселей доминирующего класса.

3. После формирования итоговой таблицы, содержащей метрику «чистоты» и средние значения спектральных характеристик каждого кластера, выполняется фильтрация по критерию «чистоты» больше 80%.

4. Полученная таблица данных используется для обучения алгоритма классификации.

Результаты

По результатам анализа графиков распределения значений яркости пикселей

водных и не водных объектов (рис. 1) на примере признака NDWI было установлено, что при попадании объекта в зону затемнения его спектральные характеристики претерпевают качественные изменения, причем для разных типов объектов эти изменения имеют разный характер. Это обстоятельство обуславливает необходимость раздельного анализа освещенной и затемненной зон.

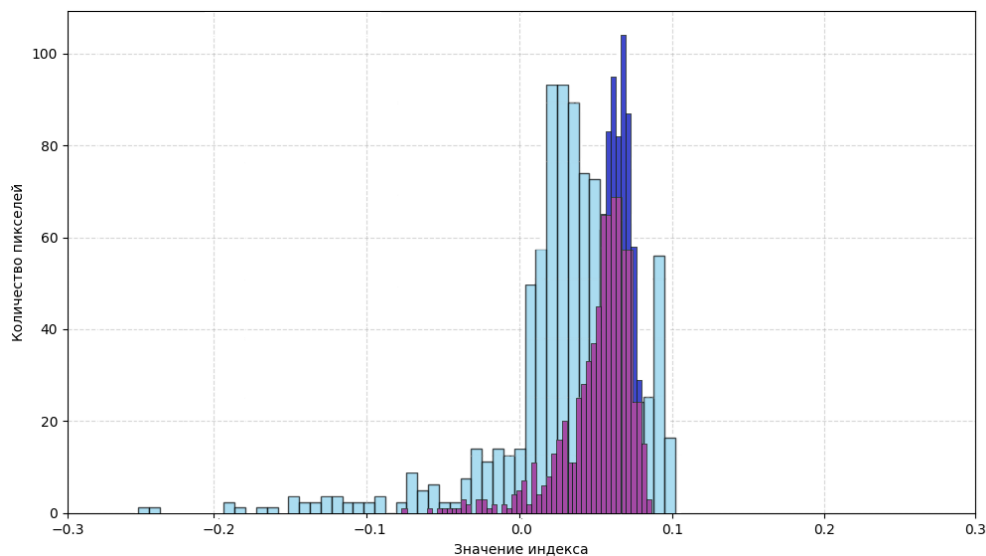


Рис. 1. Гистограммы распределения значений индекса NDWI для водного объекта. Голубым цветом – значение характеристики на освещенном участке, темно-синим – на затемненном, фиолетовым – пересечение распределений

Для оценки качества работы созданного алгоритма были выбраны метрики Precision, Recall, IoU для водного класса. Так как снимки тестовой выборки содержали сцены, которые могли относиться к одному и тому же паводковому явлению в разные моменты времени, для оценки качества использовались две стратегии усреднения – по всем снимкам сразу или с предварительным усреднением метрик для снимков из одного района съемки с последующим глобальным усреднением.

В табл. 1 представлены достигнутые предложенным алгоритмом метрики качества на тестовом наборе данных WorldFloods. В табл. 2 представлены метрики, достигнутые моделями глубокого обучения, предложенными авторами датасета [3]. Как следует из полученных результатов, разработанный алгоритм демонстрирует высокое качество работы в сложных условиях, сопоставимое с современными нейросетевыми моделями.

По результатам визуального анализа снимков, предоставленных «НИЦ Планета», был установлен перечень проблемных зон, в которых предложенный алгоритм допускает ошибки. Среди них можно выделить зоны с частично прозрачными облаками (рис. 2), с низкой яркостью водных объектов, где вода не выделяется в полном объеме, а также гористую и холмистую (рис. 3) местность, в которых алгоритм дает ложноположительные срабатывания на тених от рельефа.

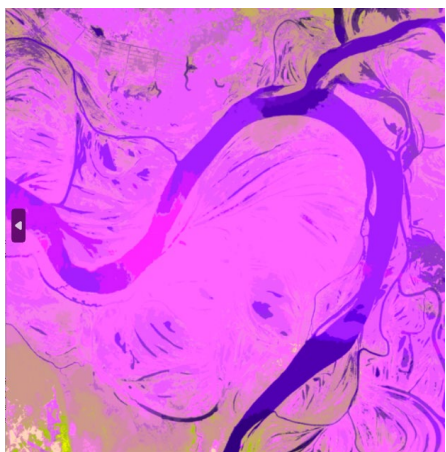


Рис. 2. Слева – композит из R-NIR-NDVI каналов, справа – результат предсказания алгоритма поверх RGB-композита (вода выделена ярко-синим)

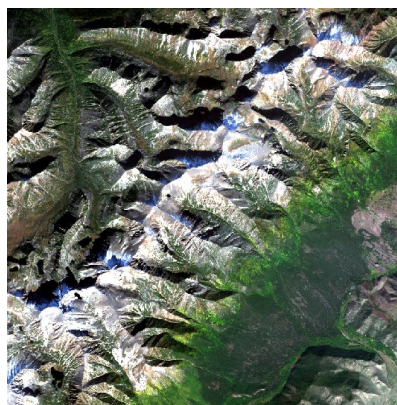


Рис. 3. Слева – RGB композит снимка в гористой местности, справа – результат выделения воды алгоритмом (белым цветом выделяется вода)

Заключение

В работе рассмотрена задача автоматического выделения водной поверхности на мультиспектральных спутниковых снимках Sentinel-2 в условиях паводков и повышенной облачности. Предложен гибридный алгоритм, сочетающий предварительное выделение зон облачности и теней, кластеризацию по спектральным индексам NDWI, NDVI, MNDWI и последующую классификацию кластеров с использованием ансамблевого алгоритма случайного леса.

В ходе исследования было показано, что спектральные характеристики объектов в освещённых и теневых областях сцены существенно различаются. Это обуславливает необходимость их независимой обработки при решении задачи сегментации водной поверхности. Для предварительного выделения зон различной освещённости использовался алгоритм OmniCloudMask, формирующий маски облаков и теней от облаков.

Экспериментальная оценка на наборе данных WorldFloods показала, что

предложенный алгоритм обеспечивает высокое качество выделения водной поверхности в сложных условиях съёмки, включая наличие облачности, теней и низкого контраста сцен. Полученные результаты оказались сопоставимы с результатами современных нейросетевых моделей, предложенных авторами набора данных. Алгоритм продемонстрировал высокую скорость обработки полноразмерных сцен Sentinel-2, что делает его пригодным для оперативного мониторинга паводковой ситуации.

По результатам визуального анализа были выявлены основные проблемные случаи, приводящие к ошибкам сегментации: частично прозрачная облачность, низкая яркость водных объектов и гористая местность, в которой возможны ложноположительные срабатывания на тенях от рельефа.

В дальнейшем планируется исследование альтернативных вариантов нормализации данных в освещенных, затемненных и облачных зонах, а также оптимизация алгоритма для уменьшения потребления ресурсов.

Таблица 1. Оценки качества работы предложенного алгоритма на наборе WorldFloods

Метрика	Усреднение по снимкам	Усреднение по событиям
По всему снимку		
IoU	91,46	91,29
Precision	92,63	92,46
Recall	98,24	98,32
По облачной зоне		
IoU	90,45	91,81
Precision	90,56	91,92
Recall	99,78	99,81
По зоне без облачности		
IoU	91,76	91,52
Precision	92,98	92,74
Recall	98,20	98,29

Таблица 2. Оценки качества работы моделей, предложенных авторами набора WorldFloods

Архитектура	Вид модели	Recall	Precision	IoU
Unet	Multiclass	92,23	91,51	85,29
Unet	Multioutput binary	94,19	86,94	82,45
Unet S2-to-L8	Multioutput binary	96,35	86,18	83,49
Unet RGBNIR	Multioutput binary	93,50	84,33	79,86

Благодарности

Авторы выражают благодарность Сибирскому центру ФГБУ «НИЦ «Планта» за предоставленные спутниковые снимки и комментарии по их обработке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Portalés-Julià E., Mateo-García G., Gómez-Chova L. Understanding Flood Detection Models Across Sentinel-1 and Sentinel-2 Modalities and Benchmark Datasets. 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm?abstractid=5118486> (дата обращения: 20.05.2025).
2. Amitrano D., Martino G.Di, Simone A.Di, Imperatore P. Flood detection with SAR: A review of techniques and datasets // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16. – No. 4. – P. 656.
3. Portalés-Julià E. et al. Global flood extent segmentation in optical satellite images // Scientific reports. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – С. 20316.
4. Wright N. et al. Training sensor-agnostic deep learning models for remote sensing: Achieving state-of-the-art cloud and cloud shadow identification with OmniCloudMask // Remote Sensing of Environment. – 2025. – Т. 322. – С. 114694.
5. Рылов С.А., Новгородцева О.Г., Пестунов И.А., Дубровская О.А. Технология обработки данных с космических аппаратов "Канопус-В", "Ресурс-П" и "Метеор-М" для мониторинга и картографирования паводковой ситуации // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : Материалы II Международной научной конференции, Красноярск, 22–25 сентября 2015 года. – Красноярск: СУФ, 2015. – С. 207-212.
6. Rylov S.A., Pestunov I.A. Fast hierarchical clustering of multispectral images and its implementation on NVIDIA GPU // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). – 2018. – Vol. 1096. – P. 012039.
7. Сиденко М. Е., Рылов С. А. Влияние спектральных характеристик и методов предобработки спутниковых снимков при выделении водной поверхности // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2025. – Т. 4. – С. 51.
8. Breiman L. Random forests // Machine learning. – 2001. – Т. 45. – №. 1. – С. 5-32.
9. Pedregosa F. et al. Scikit-learn: Machine learning in Python // the Journal of machine Learning research. – 2011. – Т. 12. – С. 2825-2830.
10. McFeeters, S.K. Using the Normalized Difference Water Index (NDWI) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: a practical approach // Remote Sensing. – 2013. – Vol. 5. – No. 7. – P. 3544-3561.
11. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International journal of remote sensing. – 2006. – Т. 27. – №. 14. – С. 3025-3033.

© М. Е. Сиденко, С. А. Рылов, 2026

С. К. Фарбер^{1✉}, Н. С. Кузьмик¹, А. А. Мартынов¹

Оптимизация затрат на строительство лесовозных дорог

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ
СО РАН, г. Красноярск, Российская Федерация
e-mail: sfarber@ksc.krasn.ru

Аннотация. Наличие дорог – необходимое условие, предваряющее заготовку древесины и последующее выполнение лесохозяйственных мероприятий. Проект прокладки трассы дороги разрабатывается с использованием тематических карт рельефа, почвенно-грунтовых и гидрологических условий местности [2]. Использование крупномасштабной аэрокосмической съемки с изолиниями абсолютных высот декларируется как прогрессивное, поскольку сокращает сроки проведения камеральных изысканий и повышает качество трассирования [1]. Полагаем, что дополнительное обоснование стоимости строительства дороги математическими методами оптимизации позволит существенно повысить качество экономического блока проекта.

Ключевые слова: лесовозные дороги, стоимость, строительство, динамическое программирование

S. K. Farber^{1✉}, N. S. Kuzmik¹, A. A. Martynov¹

Cost optimization of logging road construction

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center
SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation
e-mail: sfarber@ksc.krasn.ru

Abstract. The presence of roads is a necessary condition preceding timber harvesting and subsequent silvicultural activities. The road alignment project is developed using thematic maps of terrain, soil and hydrological conditions (Ilyin, Kuvaldin, 1982). The use of large-scale aerospace survey with absolute elevation contours is declared to be progressive, as it reduces the time of office surveys and improves the quality of routing (Buldakov, Savsyuk, 2016). We believe that additional justification of road construction costs using mathematical optimization methods will significantly improve the quality of the economic section of the project.

Keywords: logging roads, cost, construction, dynamic programming

Введение

Задача оптимизации выбора направления трассы по критерию наименьшей стоимости решается методами динамического программирования. При этом, должны выполняться условия:

- расстояние от начального до конечного пункта должно быть минимальным;
- выбор каждого следующего направления трассы при переходе от одного участка к другому принимается по критерию наименьшей стоимости строительства.

Методы и материалы

Нахождение траектории дороги, связывающей пункты отправления и назначения, при которой достигается минимальная стоимость строительства, производится посредством моделирования растра стоимости поверхности. Другими словами, следует получить растр, для которого рассчитана стоимость строительства дороги каждого пикселя. При наличии сведений о затратах на единицу расстояния для различных сочетаний показателей рельефа, почв и других характеристик земной поверхности, растр стоимости создается на основе соответствующего уравнения регрессии. Поскольку такого рода данные отсутствуют, можно использовать функцию картирования расстояний. В ArcGIS Spatial Analyst это функция именуется как Расстояние со взвешенной стоимостью, моделирующая расстояние с учетом заданных факторов (в нашем случае – стоимости перехода к каждому следующему пикселю растра стоимости).

К настоящему времени разработаны стандартные способы решения задачи динамического программирования. В частности, к ним относятся алгоритмы Дейкстры и Флойда [3], реализованные в виде приложений в программе TORA, которое работает по измеренным расстояниям между связуемыми пунктами. Измерение расстояний выполняются программными средствами ГИС.

Алгоритм Дейкстры. В меню SOLVE/MODIFY последовательность команд: Solve problem→Integrations→Dijkstra's algorithm.

Алгоритм Флойда. В меню SOLVE/MODIFY последовательность команд: Solve problem→Integrations→Floy's algorithm.

Результаты

Решение задачи нахождения кратчайшего пути с наименьшей стоимостью строительства демонстрируется на примере проектирования дорожной сети между лесосеками, расположенными в Терянском лесничестве Красноярского края в восточном направлении от уже существующей магистральной дороги.

Растр стоимости поверхности строится на основе нескольких показателей. В нашем примере использованы: рельеф (абсолютные высоты и уклоны местности), а также влажность почв. Единицы измерения этих показателей разные, поэтому требуется переклассификация по общей шкале 1–10. С увеличением высоты местности подстилающие породы ближе к поверхности – стоимость строительства дороги уменьшается. Напротив, увеличение крутизны склонов повышает стоимость строительства дороги. Если дорога будет эксплуатироваться в летний период, то влажность почв также будет увеличивать стоимость строительства дороги.

Растры высот и уклонов получены посредством пространственного анализа ЦМР (SRMT). Растр влажности почв получен посредством пространственного анализа укрупненных характеристик лесотаксационных выделов (главным образом типов лесов). Доля влияния учитываемых показателей в формировании растра стоимости на стоимость строительства оценена в экспертном порядке: абсолютная высота 0,25, уклон 0,25, влажность почв 0,50. Итоговый растр стоимости

дорог является результатом сложения полученных растров высот, уклонов, влажности почв. Более темные цвета на растре стоимости означают относительно меньшие затраты на строительство дорог. Следовательно, дорога должна следовать по более темным пикселям растра (рис. 1).

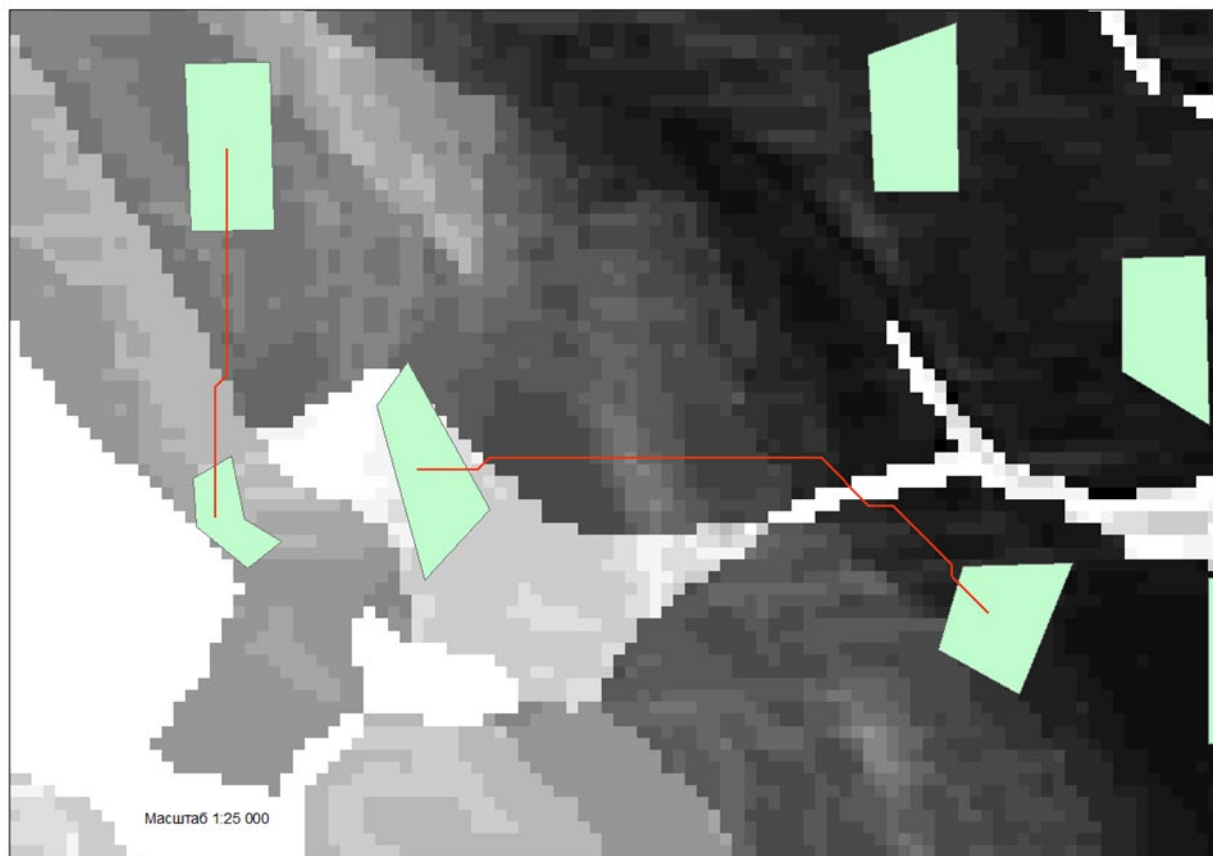


Рис. 1. Направления дорог по критерию наименьшей стоимости строительства

Заключение

Результаты измерения расстояний между лесосеками демонстрируются в табличной форме программы TORA, на основании которых по алгоритмам Дейкстры и Флойда получен искомый проект трасс, связывающих лесосеки, оптимальный по расстоянию и стоимости (рис. 2, 3)

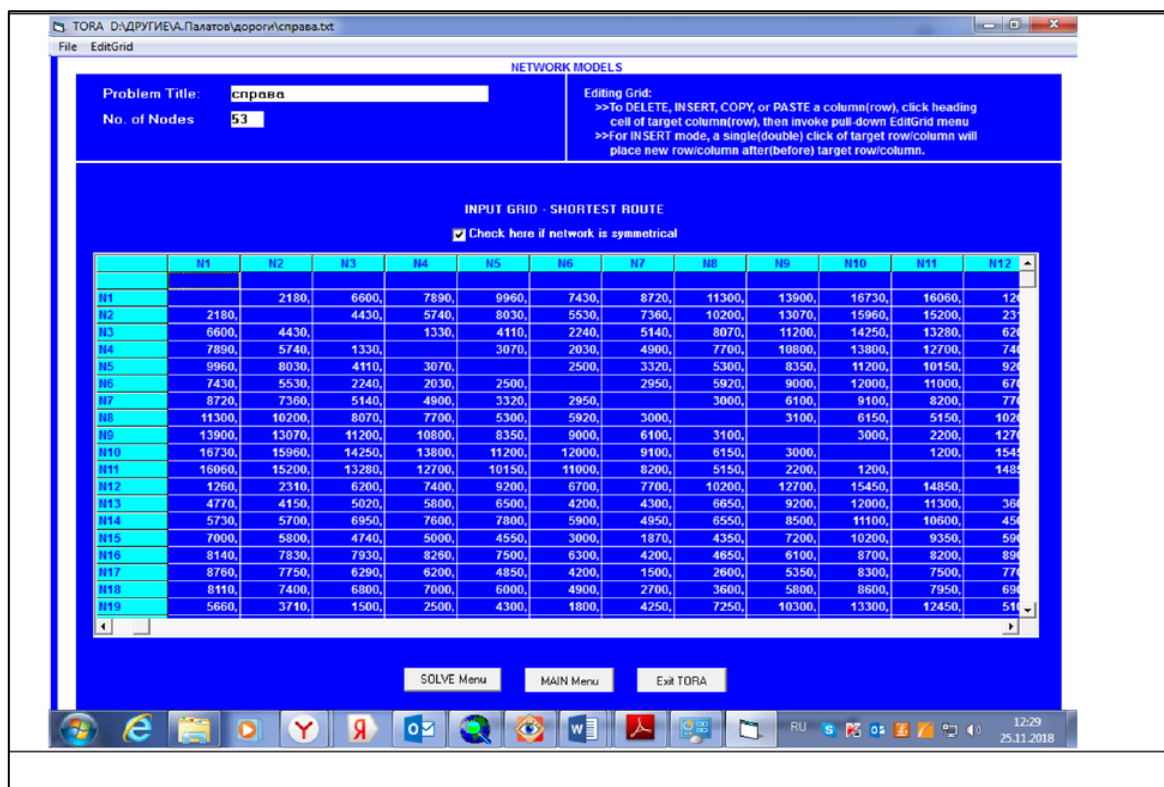


Рис. 2. Расстояния между лесосеками, м (фрагмент)

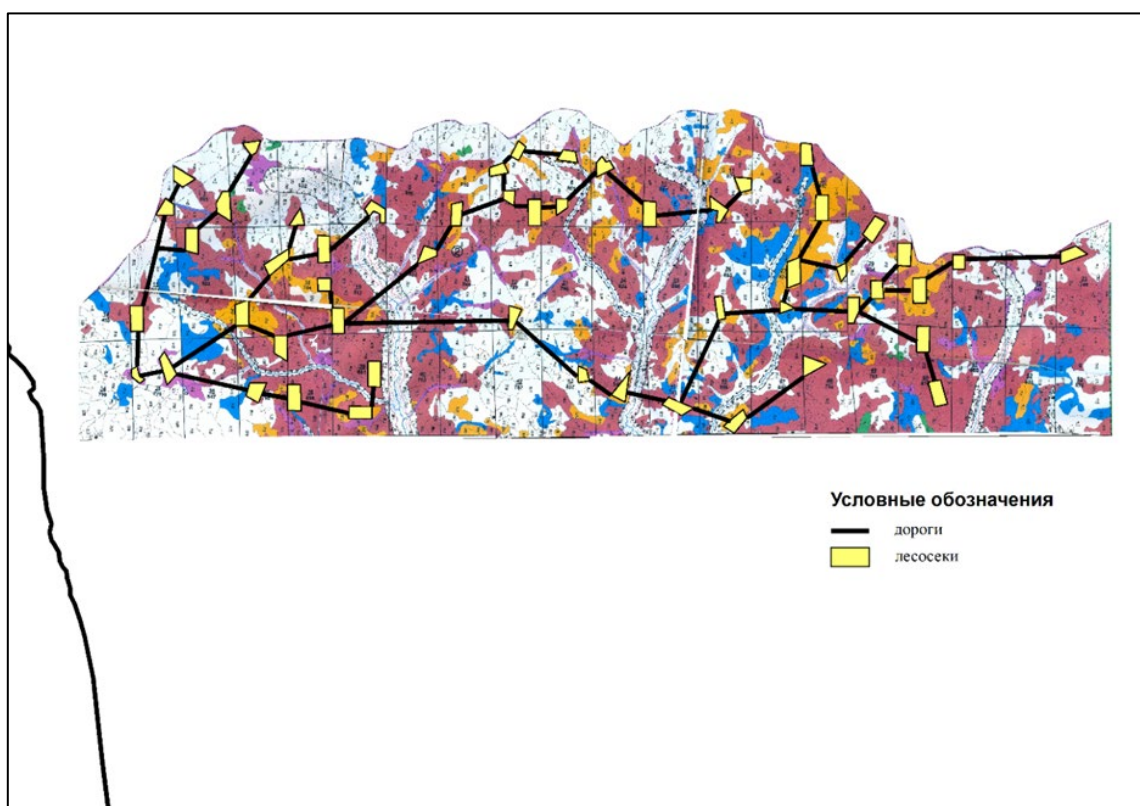


Рис. 3. Проект лесовозных дорог оптимальный по расстоянию и стоимости строительства

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания «Роль природных и антропогенных факторов в системе устойчивого управления лесами Сибири» (рег. № 124012900559-4)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булдаков С.И., Савсюк М.В. Автомобильные лесовозные дороги: учеб. Пособие. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016 – 97 с.
2. Ильин Б.А., Кувалдин Б.И. Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог: Учебник для вузов.- М.: Лесн. пром-сть, 1982,- 384 с.
3. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций. 7-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. - 912 с.

© С. К. Фарбер, Н. С. Кузьмик, А. А. Мартынов, 2026

Д. А. Шатилов¹, С. А. Рылов¹✉

Оценка эффективности методов аугментации для обучения CNN-моделей на малых мультиспектральных выборках

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: RylovS@mail.ru

Аннотация. Применение моделей глубокого обучения к данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) существенно осложняется проблемой адаптации домена (domain adaptation), обусловленной статистическими различиями в обучающей и целевой выборках. В данной работе исследуется специфика и эффективность методов аугментации мультиспектральных данных для обучения свёрточных нейронных сетей (CNN) на примере задачи построения карт сегментации древостоев по данным со спутников «WorldView-2» и «Ресурс-П». Использование процедуры кросс-валидации позволило количественно оценить эффективность динамической аугментации: зафиксировано улучшение метрик на 6,17% и 14,46% для macro-accuracy и macro-IoU, соответственно. Установлено, что наибольшую эффективность демонстрируют геометрические преобразования, в то время как модификации спектральных характеристик могут приводить к деградации качества моделей. Эксперимент по трансферному обучению продемонстрировал, что спектральные трансформации повышают адаптивность моделей к межсенсорным различиям.

Ключевые слова: адаптация домена, аугментация данных, семантическая сегментация, мультиспектральные изображения, дистанционное зондирование, свёрточные нейронные сети

D. A. Shatilov¹, S. A. Rylov¹✉

Evaluating augmentation method effectiveness for CNN training on small multispectral datasets

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: RylovS@mail.ru

Abstract. The application of deep learning models to remote sensing data is significantly complicated by the domain adaptation problem, caused by statistical differences between training and target samples. This paper investigates the specificity and effectiveness of augmentation methods for multispectral data in training convolutional neural networks (CNN) on the task of tree species segmentation with «WorldView-2» and «Resurs-P» satellite data. The use of cross-validation procedure allowed quantitative evaluation of dynamic augmentation effectiveness: macro-accuracy and macro-IoU improved by 6,17% and 14,46% respectively. Geometric transformations were proved to demonstrate the highest effectiveness, while modifications of spectral characteristics can lead to model performance degradation. The transfer learning experiment demonstrated that spectral transformations increase model adaptability to inter-sensor differences.

Keywords: domain adaptation, data augmentation, semantic segmentation, multispectral images, remote sensing, convolutional neural networks

Введение

Проблема адаптации домена представляет собой одну из наиболее актуальных задач машинного обучения [1], возникающую при применении моделей, обученных на исходном наборе данных, к целевому домену с отличным статистическим распределением признаков. Современные подходы к решению данной проблемы классифицируются на три категории [2]: нормализация входных данных, методы самообучения для извлечения доменно-инвариантных признаков и использование масштабных наборов данных. Благодаря этим подходам современные архитектуры, такие как DINOv2, MAE, SAM и SegFormer, способны формировать робастные признаки, обобщаемые на различные домены.

При решении задач семантической сегментации изображений ДЗЗ выявляется ряд специфических ограничений: критический дефицит размеченных данных, разнородность спутниковых сенсоров с различным количеством спектральных каналов, а также вариабельность физической природы пиксельных данных в зависимости от уровня предобработки [3] – это могут быть, как и стандартные цифровые значения (Digital Number, DN), так и значения коэффициента отражения (Remote Sensing Reflectance, RSR).

К числу наиболее сложных относятся задачи распознавания объектов со сходными спектральными характеристиками, например, различных видов деревьев [4]. Дифференциация по типам древесных насаждений возможна преимущественно в мультиспектральном диапазоне [5], что делает невозможным прямое использование предобученных RGB-моделей.

В данной работе проводится оценка эффективности методов аугментации данных для повышения точности работы нейронных сетей при обучении на малых мультиспектральных выборках. Исследуются три категории аугментаций: пространственные, спектральные и смешивающие преобразования. Целью исследования является определение оптимальных стратегий аугментации для задач мультиспектральной сегментации в условиях ограниченного объема размеченных данных ДЗЗ.

Методы и материалы

В качестве тестового полигона выбрана территория Бронницкого лесничества в Московской области, включающая 11 доминантных классов лиственных и хвойных пород, а также классы «Не лес» и «Нет информации» (исключён из прогнозирования). Векторная карта разметки была получена в работе [6].

В настоящей работе использованы разновременные мультиспектральные спутниковые снимки для выбранной территории. Данные со спутника «WorldView-2» (съёмка выполнена в летний период до 2017 года) включают 8 спектральных каналов в диапазоне 400–1040 нм, подвергнуты процедуре атмосферной коррекции и представлены значениями RSR в формате float. Данные со спутника «Ресурс-П» (съёмка выполнена в 2018 году) включают 4 спектральных канала (RGB+NIR), подвергнуты процедуре радиометрической коррекции и представлены стандартными цифровыми значениями (Digital Numbers, DN) в формате uint16. После процедуры географи-

ческого выравнивания сформированы два датасета по 81 тайл размерами 256×256 пикселей.

Для проведения семантической сегментации применены архитектуры FPN, LinkNet, U-Net, U-Net++, Attention U-Net и U²-Net с энкодером ResNet-50 [7]. Функция потерь – линейная комбинация взвешенной функции потерь Дайса и модифицированной кросс-энтропии [8]. Оценка качества осуществлялась по метрикам maseo-accuracy и maseo-IOU. Дополнительно для оценки точности моделей использовалась 4-кратная кросс-валидация. Входные данные подвергнуты поканальной стандартизации.

Всего исследованы три категории аугментации данных:

1. Пространственные преобразования (к изображениям и маскам): трансляция, поворот, отражение.

2. Спектральные преобразования (только изображения): гауссовский шум, варьирование контраста и повышение резкости. Также предложено обобщение HSV-преобразований на мультиспектральный случай: выбор трёх случайных каналов, линейное масштабирование к диапазону $[0; 1]$, случайное преобразование тона, яркости или насыщенности с последующим обратным масштабированием.

3. Батч-смешивающие преобразования (изображения и маски): CutMix [9] и MixUp [10].

Результаты

Рассмотрены два подхода к применению аугментации: статический, предполагающий однократное расширение тренировочной выборки, и динамический, заключающийся в аугментации на каждой эпохе обучения. Обучение всех CNN-архитектур проводилось на 8-канальных снимках «WorldView-2» (RSR). Сравнивались конфигурации: статическое расширение в 4 и 8 раз, пространственные аугментации, комбинации пространственных, спектральных и батч-смешивающих преобразований. Результаты усреднены по всем моделям и кросс-валидации (рис. 1). Лучшее значение maseo-IOU достигло 0,48 при использовании динамического подхода.

В контексте проблемы адаптации домена исследован перенос весов моделей между разнородными сенсорами без дообучения: модели, обученные на данных «WorldView-2», применялись к данным спутника «Ресурс-П». Для обеспечения корректности переноса отобраны 4 канала $[R, G, B, NIR1]$, близких по спектральному диапазону. Поканальная стандартизация выполнена независимо для каждого датасета. При использовании геометрических преобразований в сочетании со спектральными и батч-смешивающими преобразованиями получены результаты, приведённые на рис. 2. Наилучшее качество достигнуто при комбинации геометрических преобразований с гауссовым шумом, варьированием контраста, повышением резкости, HSV-преобразованиями и CutMix (рис. 3).

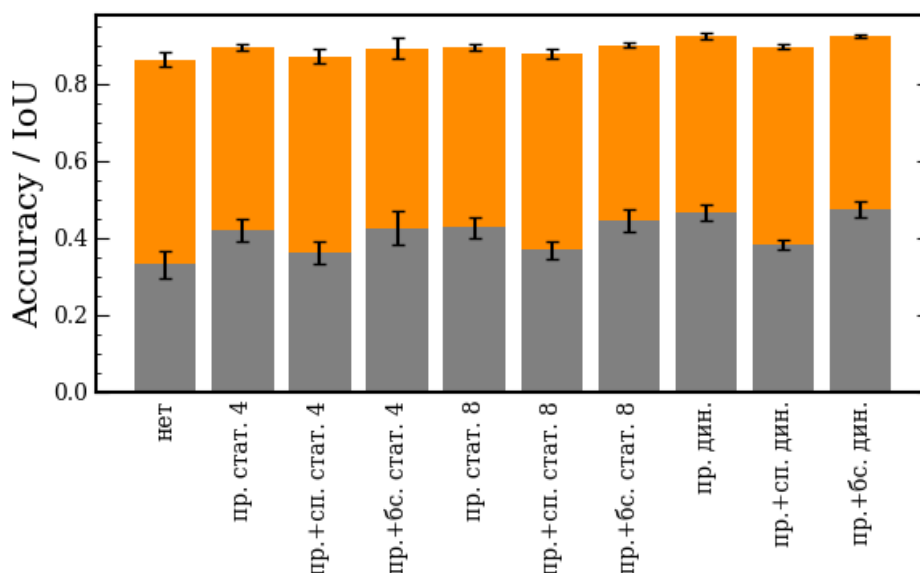


Рис. 1. Усредненные значения метрик в зависимости от различных конфигураций аугментаций при обучении на 8-канальном датасете «WorldView-2». Сокращения: пр. – пространственные, сп. – спектральные, бс. – батч-смешивающие, стат. – статические, дин. – динамические

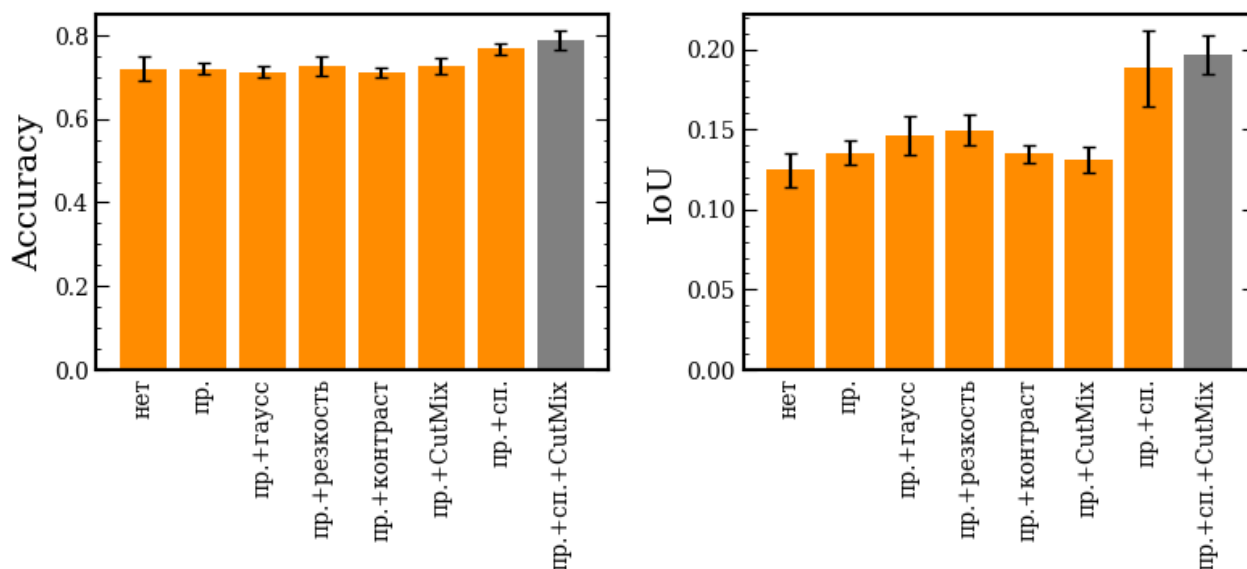


Рис. 2. Усредненные значения метрик в зависимости от различных конфигураций аугментаций, использованных во время обучения модели, при переносе ее весов на 4-канальный датасет «Ресурс-П»

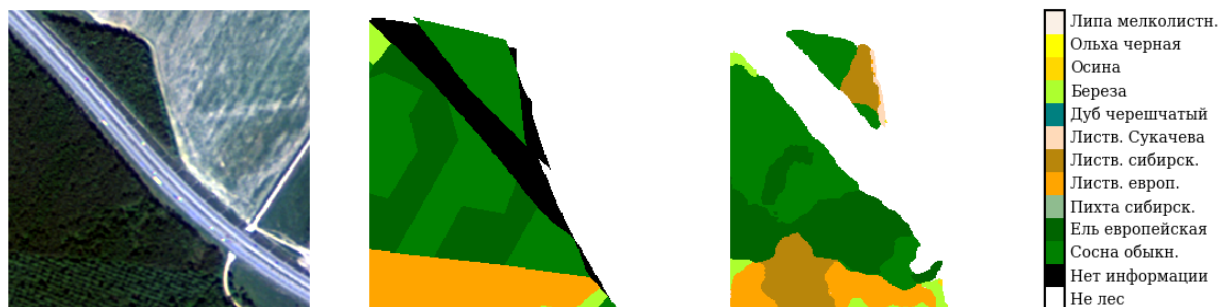


Рис. 3. RGB-композит снимка со спутника «Ресурс-П» (слева), данные разметки (по центру) и построенная Link-Net карта сегментации (справа)

Обсуждение

Значительный прирост точности (+6,17% macro-accuracy и +14,46% macro-IoU) при использовании динамической аугментации объясняется расширением разнообразия тренировочного набора и внесением стохастичности в процесс обучения, что повышает регуляризующий эффект и снижает риск переобучения [11]. Статический подход демонстрирует меньший прирост точности вследствие меньшей вариативности между эпохами, что может приводить к запоминанию артефактов аугментации и формированию ложных корреляций.

Снижение метрик при переходе к данным «Ресурс-П» обусловлено шумами синего канала и временным несоответствием между съёмкой и разметкой (вырубки, антропогенные объекты). Тем не менее, полученные результаты подтверждают корректность предложенных методов аугментации для задач семантической сегментации мультиспектральных изображений, о чём свидетельствует устойчивое уверенное распознавание классов хвойных и лиственных насаждений.

Заключение

В рамках исследования проведена оценка эффективности методов аугментации для обучения CNN на малом мультиспектральном датасете из 81 тайла размером 256×256 . Экспериментально подтверждено, что динамическая аугментация обеспечивает статистически значимое улучшение качества сегментации на 14,46% по метрике macro-IoU по сравнению с обучением без аугментации. Установлено, что пространственные преобразования вносят наибольший вклад в повышение качества моделей, тогда как спектральные преобразования могут снижать точность вследствие формирования физически некорректных комбинаций спектральных значений. При переносе весов между данными «WorldView-2» и «Ресурс-П» без дообучения показано, что комбинация независимой поканальной стандартизации и спектральных аугментаций повышает робастность моделей к межсенсорной вариации ценой некоторого снижения точности на исходных данных, что представляет собой классический компромисс между точностью и обобщающей способностью [2].

В качестве перспективного направления исследований представляется применение методов самообучения, в частности контрастивного обучения, для которых

агрессивные аугментации являются механизмом формирования позитивных пар изображений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Singhal P., Walambe R., Ramanna S., Kotecha K. Domain Adaptation: Challenges, Methods, Datasets, and Applications // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 6973-7020.
2. Wang M. A Deep visual domain adaptation: A survey // Neurocomputing. – 2018. – Vol. 312. – P. 135-153.
3. Hill V. J., Zimmerman R. C., Bissett P. et al. Impact of Atmospheric Correction on Classification and Quantification of Seagrass Density from WorldView-2 Imagery // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, № 19. – Art. 4715. – DOI: 10.3390/rs15194715.
4. Key T., Warner T., McGraw J. et al. Comparison of Multispectral and Multitemporal Information in High Spatial Resolution Imagery for Classification of Individual Tree Species in a Temperate Hardwood Forest // Remote Sensing of Environment. – 2001. – Vol. 75 – P. 100-112.
5. Fassnacht F.E., Latifi H., Sterenczak K. et al. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 186. – P. 64–87.
6. Дмитриев Е.В., Кондранин Т.В., Мельник П.Г., Донской С.А. Определение видового состава смешанного леса на основе совместной обработки публичных спутниковых карт и многовременных изображений Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 21. – № 1. – С. 31-50.
7. Agrawal S., Rewaskar V., Agrawal R. et al. Advancements in NSFW Content Detection: A Comprehensive Review of ResNet-50 Based Approaches // Journal of intelligent systems and applications in engineering. – 2023. – Vol. 11 (4). – P. 41-45.
8. Шатилов Д.А., Рылов С.А. Семантическая сегментация лесных массивов на спутниковых снимках высокого разрешения с помощью U-Net-подобных моделей // Вычислительные технологии. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 111-126.
9. Yun S., Han D., Oh S. J. et al. CutMix: Regularization Strategy to Train Strong Classifiers with Localizable Features [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1905.04899> (дата обращения: 02.05.2026).
10. Zhang H., Cisse M., Dauphin Y. N. et al. mixup: Beyond Empirical Risk Minimization [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1710.09412> (дата обращения: 02.05.2026).
11. Shorten C., Khoshgoftaar T. M. A Survey on Image Data Augmentation for Deep Learning // Journal of Big Data. – 2019. – Vol. 6, № 1. – Art. 60.

© Д. А. Шатилов, С. А. Рылов, 2026

В. В. Гололобов¹, Н. Н. Завалишин¹✉

Аппроксимация расходов воды кусочно-квадратической функцией от уровня воды по постам Верхней Оби

¹ФГБУ «Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт»,
г. Новосибирск, Российская Федерация,
e-mail: znn@sibnigmi.ru

Аннотация. Расход воды через створ реки зависит от многих факторов: конфигурации сечения реки, шероховатости дна и берегов, уклона реки, средней скорости течения, зависимость скорости от глубины реки. С учетом всех этих факторов составляются таблицы зависимости расхода воды от глубины реки в сечении. Целью исследований является аппроксимация расходов воды кусочно-квадратической функцией от отметок глубины реки.

Ключевые слова: таблица расходов, аппроксимация, кусочно-квадратическая, уровень воды

V. V. Gololobov¹, N. N. Zavalishin¹✉

Approximation of water flow rates by a piecewise quadratic function of water level at the Upper Ob stations

¹Siberian Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk, Russian Federation,
e-mail: znn@sibnigmi.ru

Abstract. The flow rate of water through a river gate depends on many factors: the configuration of the river cross-section, the roughness of the riverbed and banks, the slope of the river, the average flow rate, and the dependence of the flow rate on the depth of the river. Taking all these factors into account, tables are compiled that show the dependence of the flow rate of water on the depth of the river in the cross-section. The purpose of these studies is to approximate the flow rates of water using a piecewise quadratic function based on the depth of the river.

Keywords: flow rate table, approximation, piecewise quadratic, water level

Введение

Как, зная отметки по глубине реки, найти соответствующие расходы реки в данном створе? Наибольшего успеха в решении поставленного вопроса добились для рукотворных открытых каналов. Что естественно: все параметры каналов спроектированы и построены человеком. Введен государственный стандарт вычисления расходов воды в каналах [1]. Выдано свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [2] с целью вычисления расхода воды в открытых каналах по методу "уклон - площадь". Отметим ещё две статьи с сечением канала треугольного вида [3] и, что особенно важно для нашего исследования, с сечением в виде трапеции [4]. В последнем случае расход пропорционален квадратической функции от глубины реки.

Модель

Расход воды Q , протекающей через створ, определяется произведением площади сечения створа S на среднюю скорость воды в створе V . Площадь створа, рис. 1, состоит из прямоугольника и двух треугольников по бокам. Иначе говоря, площадь сечения есть многочлен второй степени относительно параметра h .

Тогда расход воды через створ равен

$$Q(h) = V \left(\frac{(\operatorname{ctg}(v) + \operatorname{ctg}(w))}{2} h^2 + dh \right) + q = ah^2 + bh + q \quad (1)$$

Коэффициент q задает расход воды ниже трапеции,

$$a = \frac{V(\operatorname{ctg}(v) + \operatorname{ctg}(w))}{2}, \quad b = Vd$$

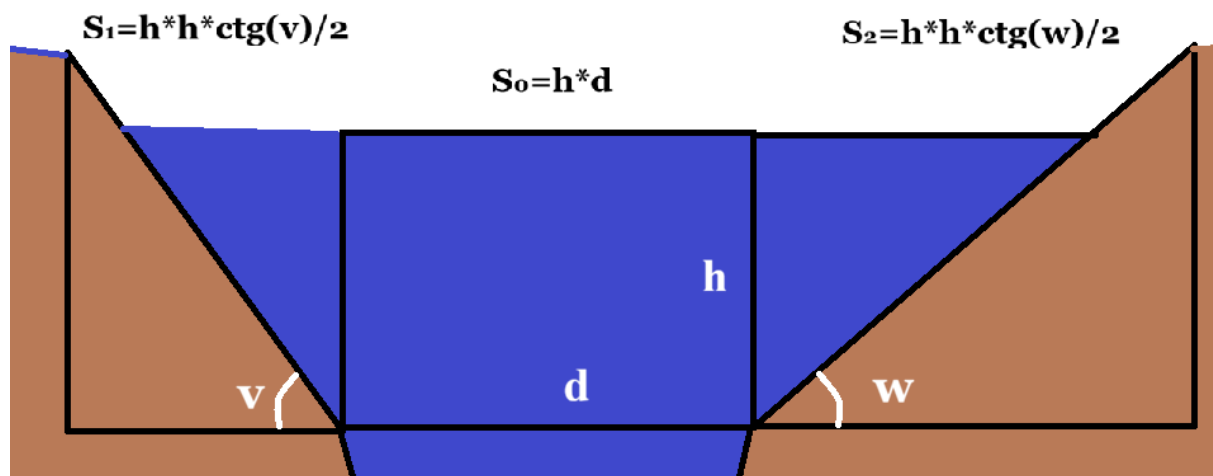


Рис. 1. Схема участка створа реки глубиной h , углом наклона берегов v , w и дном d .

Анализ начнем со створа «Бердь-Старый Искитим». В нашем распоряжении есть таблица расходов воды Q от глубины h , с шагом $h=1$ см, представленная специалистами Гидрометцентра Западно-Сибирского УГМС (табл. 1).

Подберем коэффициенты a , b , q уравнения (1) методом минимальных квадратов, рассматривая только нулевой столбец табл. 1. Перенумеруем отметки глубины, начиная с 1 для отметки 60 см, 2 для отметки 70 см и так далее до 31 для отметки 320 см.

Таблица 1. Фрагмент таблицы зависимости расхода воды от отметок уровня воды по створу Бердь-Старый Искитим

Н, см	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60	15,2	15,8	16,4	17,1	17,8	18,4	19,1	19,8	20,5	21,2
70	21,9	22,6	23,3	24,1	24,8	25,6	26,3	27,1	27,9	28,7
80	29,5	30,3	31,1	31,9	32,7	33,6	34,4	35,3	36,1	37,0
90	37,9	38,7	39,6	40,5	41,4	42,3	43,2	44,2	45,1	46,0
100	47,0	47,9	48,9	49,8	50,8	51,8	52,8	53,8	54,8	55,8

Значения коэффициентов: $a=0,339$ $b=4,90$ $q=12,8$

Например, для глубины номер 5 (отметка 100 см) расход по таблице равен 47 м³/сек, а по оценке параболической моделью равен 46 м³/сек; для глубины номер 15 (отметка 200 см) расход по таблице равен 172 м³/с, а по модели равен 163 м³/сек.

В предположении, что найденная связь сохранится с ростом глубины, продолжили модель на несколько точек вперед (рис. 2).

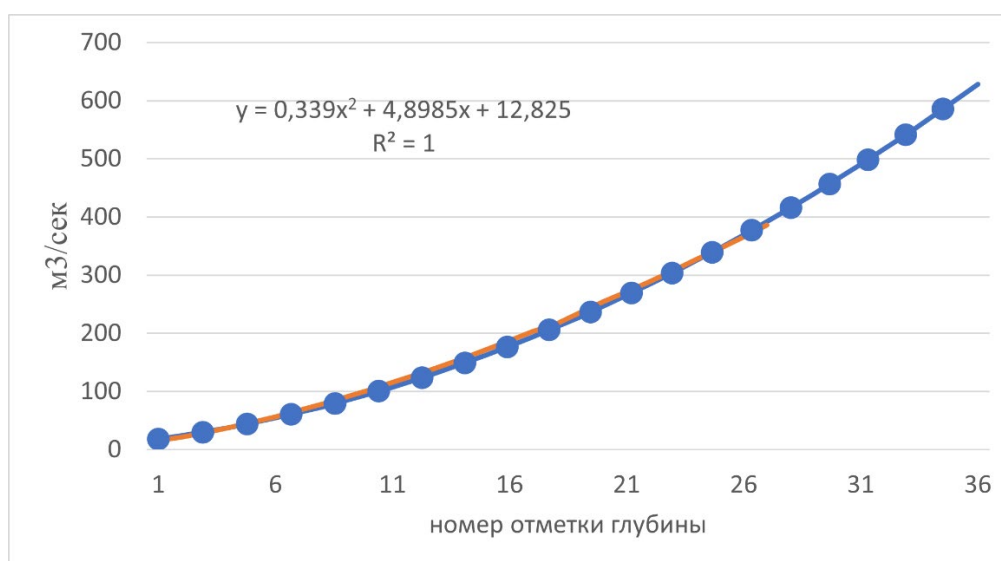


Рис. 2. Расход воды через створ Бердь-Старый Искитим (красный) и его аппроксимация с прогнозом параболической функцией (синий).

Среднеквадратическое отклонение разницы между табличным значением и модельным составляет 4,52 м³/сек. При среднем потоке в 172 м³/сек два СКО составляют около 5%, что вполне приемлемо.

Следующий вопрос: изменения наклона берега. Тогда изменятся коэффициенты уравнения (1) и наша задача уловить эти изменения. Рассмотрим более сложный вариант: створ «Обь-Барнаул». На рис. 3 приведена разность между

фактом и моделью (1), где модель построена для всего ряда данных. Полученные коэффициенты:

$$a=0,503 \quad b=35,8 \quad q=611$$

Из рис. 3 видно, что есть три точки в которых модель начинает вести себя «по-другому». На интервале $-30 \div 100$ см разница между фактом и моделью почти не меняется, но она начинает расти на интервале $110 \div 260$ см, потом падает на интервале $270 \div 440$ см и, наконец, снова растет на интервале $450 \div 570$ см. Итак, нам предстоит построить четыре модели на указанных интервалах.



Рис. 3. Разница между табличными значениями расхода воды в створе Обь-Барнаул и модельными значениями в зависимости от отметок глубины реки.

В табл. 2 представлены коэффициенты параболических моделей.

Таблица 2. Коэффициенты параболических моделей расходов воды по створу Обь-Барнаул и СКО между табличным и модельным значением расхода воды

Интервал отметок глубины (см)	a (м/сек)	b (м2/сек)	q (м3/сек)	СКО (м3/сек)
-30 ÷ 570	0,503	35,8	611	28,3
-30 ÷ 100	0,436	36,5	603	1,72
110 ÷ 260	0,515	52,4	1204	4,76
270 ÷ 440	0,421	61,8	2178	2,65
450 ÷ 570	0,944	88,8	3431	2,80

В последующих таблицах под номерами 3-5 представлены результаты для створов: Бия-Бийск, Катунь-Сростки и Чумыш- Тальменка.

Таблица 3. Коэффициенты параболических моделей расходов воды по створу Бия-Бийск и СКО между табличным и модельным значением расхода воды

Интервал отметок глубины (см)	a (м/сек)	b (м ² /сек)	q (м ³ /сек)	СКО (м ³ /сек)
50 ÷ 350	0,950	32,2	175	13,8
50 ÷ 110	2,06	14,9	224	1,02
120 ÷ 270	0,972	47,7	427	2,12
280 ÷ 350	0,488	74,6	1434	1,06

Таблица 4. Коэффициенты параболических моделей расходов воды по створу Катунь-Сростки и СКО между табличным и модельным значением расхода воды

Интервал отметок глубины (см)	a (м/сек)	b (м ² /сек)	q (м ³ /сек)	СКО (м ³ /сек)
210 ÷ 570	0,951	47,0	144	44,5
210 ÷ 300	0,992	31,6	236	1,10
310 ÷ 360	1,25	65,1	654	0,65
370 ÷ 480	0,0	97,0	1070	4,83
490 ÷ 570	0,0	100,0	2260	0,0

Таблица 5. Коэффициенты параболических моделей расходов воды по створу Чумыш-Тальменка и СКО между табличным и модельным значением расхода воды

Интервал отметок глубины (см)	a (м/сек)	b (м ² /сек)	q (м ³ /сек)	СКО м ³ /сек)
-30 ÷ 570	0,503	35,8	611	28,3
-30 ÷ 100	0,436	36,5	603	1,72
110 ÷ 260	0,515	52,4	1204	4,76
270 ÷ 440	0,421	61,8	2178	2,65
450 ÷ 570	0,944	88,8	3431	2,80

Сравнение точностей аппроксимации общей для всего ряда с моделями с кусочно-квадратической аппроксимацией этого ряда, показывает улучшение качества на порядок, с максимальной ошибкой по СКО не превышающей 5 м³/сек.

Отдельный вариант – выход воды на пойму, что делает пренебрежимо малым влияние квадратичного члена в (1). Отметим особенность поведения модели «Катунь-Сростки» на интервалах 370÷480 см и 490÷570 см. В обоих случаях отсутствует квадратичный член. Это свидетельствует о том, что на этих участках вода выходит на пойму.

Заключение

Мерой синхронности изменений факта и модели является квадрат коэффициента корреляции между ними, который для моделей всех типов практически равен единице.

Для тех исследований, в которых допускаются ошибки, грубо говоря, до двух СКО, то есть порядка 50-100 м³/сек, можно пользоваться общей моделью, а для более тонких исследований, с ошибками 5-10 м³/сек, нужно применять кусочно-квадратическую модель.

Предложена кусочно-квадратическая аппроксимация таблиц расходов воды в зависимости от глубины для створов Верхней Оби, заменяющая массивы из сотен чисел аналитическим выражением, содержащим 3-12 коэффициентов. Модель улавливает изменения наклона берегов.

Благодарность

Авторы выражают признательность специалистам Гидрометцентра ЗапСиб УГМС за совместную работу по созданию метода прогноза притока воды в Новосибирское водохранилище и предоставление таблиц расходов воды по створам Верхней Оби.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Государственная система обеспечения единства измерений. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом "скорость - площадь": МИ 1759-87: утв. ФГУП ВНИИФ 11.06.86: введ. в действие с 01.01.88. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 19 с.
2. Определение расхода воды в открытых каналах по методу "уклон - площадь": свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2019662079 / Вайнберг М. В., Чураев А. А.; правообладатель Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. Заявка № 2019660924; заявл. 05.09.19; опубли. 16.09.19, Бюл. № 9. 1 с. EDN: AOCHGD
3. Чураев А. А., Юченко Л. В. К вопросу об использовании гидрометрического сооружения типа «фиксированное русло» в качестве средства измерения в открытом канале // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2022. – № 2 (86). – С. 74-83.
4. Чураев А. А., Юченко Л. В., Шепелев А. Е. Принципы подхода к расчету основных параметров трапецеидального водослива при оснащении его современным прибором измерения уровня // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета [Электронный ресурс]. – 2023. – № 192(08). – С. 158-168. URL: <http://ej.kubagro.ru/2023/08/pdf/13.pdf> (дата обращения: 24.04.2024). DOI: 10.21515/1990-4665-192-013 EDN: GHFU

© В. В. Гололобов, Н. Н. Завалишин, 2026

Б. Х. Имомназаров¹✉, Х. Х. Имомназаров¹, И. К. Искандаров²

Бегущие поперечные волны в пористой среде

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация
e-mail: imom@omzg.sccc.ru

Аннотация. Получена одномерная система дифференциальных уравнений, описывающая распространение сейсмических волн в насыщенной жидкости пористых сред. Данная система является гиперболической которая описывает распространение поперечной волны в пористой среде в диссипативном приближении. Проблема существования бегущих волн в неоднородной пористой среде важна для объяснения распространения волн на большие расстояния. Рассмотрены новые решения волновых уравнений с переменными коэффициентами, описывающих бегущие SH волны в пористой среде с учетом диссипации энергии. Получена формула, связывающая амплитуду волны и акустической жесткости для пористой среды. Данная формула совпадает со знаменитым законом Грина (для жидких сред в случае постоянства плотности), известным из закона сохранения потока энергии в средах с медленно меняющимися параметрами. Такие решения получены с использованием методов преобразования, когда уравнения с переменными коэффициентами могут быть сведены к уравнению с постоянными коэффициентами.

Ключевые слова: волновое уравнение, неоднородная среда, бегущие волны, пористость, проницаемость, диссипация энергии

Bh. Kh. Imomnazarov¹✉, Kh. Kh. Imomnazarov¹, I. K. Iskandarov²

Traveling shear waves in a porous medium

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, the Russian Federation

²Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation
e-mail: imom@omzg.sccc.ru

Abstract. A one-dimensional system of differential equations describing the propagation of seismic waves in saturated porous media is obtained. This system is hyperbolic and describes the propagation of shear waves in a porous medium in the dissipative approximation. The problem of the existence of traveling waves in inhomogeneous porous media is important for explaining wave propagation over long distances. New solutions to wave equations with variable coefficients describing traveling SH waves in a porous medium are considered, taking energy dissipation into account. A formula was obtained linking wave amplitude and acoustic impedance for a porous medium. This formula coincides with the famous Green's law (for liquid media with constant density), which is known from the law of conservation of energy flux in media with slowly changing parameters. These solutions are obtained using transformation methods, where equations with variable coefficients can be reduced to an equation with constant coefficients.

Keywords: wave equation, inhomogeneous medium, traveling waves, porosity, permeability, energy dissipation

Введение

Нестационарные процессы описываются уравнениями теории фильтрации в трещиновато-пористых средах. Как отмечено в [1, 2] и других работах, в силу достаточно высокой проницаемости межблочного пространства приближения Дарси для описания нестационарных процессов могут в принципе оказаться неправомерными. Закон сохранения массы и уравнения движения жидкости в случае, когда скорость движения упругого пористого тела $\mathbf{u} = 0$ и тензор напряжений $h_{ik} = 0$, описывается следующей системой дифференциальных уравнений [3]

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_l v) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \chi \rho_l v = -\frac{1}{\rho} \nabla p. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) $v = v(t, x)$ – скорость фильтрации жидкости в упругой пористой среде с парциальной плотностью $\rho_l = \rho_l(t, x)$, $\rho = \rho_l(t, x) + \rho_s(t, x)$, $\rho_s(t, x)$ и $p = p(t, x)$ – парциальная плотность матрицы и давление соответственно, $\chi = \chi(t, x)$ – коэффициент трения, t – время, $x = (x, y, z)$ – точка из R^3 .

Как отмечено в [6], обычно при рассмотрении задач изотермической нестационарной прямолинейно-параллельной фильтрации однородной жидкости в изотропной пористой среде с учетом конечной скорости распространения возмущений пользуются законом фильтрации

$$w + \tau \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{k}{\mu_{жс}} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (3)$$

Здесь τ – постоянная размерности времени, k – коэффициент проницаемости, $\mu_{жс}$ – вязкость жидкости.

Сравнивая первое уравнение (2) с уравнением (3), получим выражение для определения постоянного τ через коэффициент трения χ_0 и парциальную плотность жидкости $\rho_{0,l}$ в модели Доровского

$$\tau = \frac{1}{\chi_0 \rho_{0,l}}.$$

В работе исследуется одномерная прямая задача распространения сейсмических волн в пористой среде.

Постановка задачи

Рассмотрим распространение сейсмических волн в неоднородной пористой среде с учетом потери энергии обусловленным коэффициентом трения $\chi(x)$:

$$\rho_s(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \chi(x) \rho_l^2(x) \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial v}{\partial t} \right) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \chi(x)\rho_l(x)(u - v) = 0, \quad (5)$$

Чтобы найти решение данной системы в виде бегущей волны, мы воспользуемся техникой преобразования (отображения), сводящей систему уравнений (4), (5) с переменными коэффициентами к системе уравнений с постоянными коэффициентами [4-6]. Для этого сделаем следующую подстановку в систему уравнений (4), (5):

$$u(t, x) = A(x)U(t, \xi(x)), \quad (6)$$

$$v(t, x) = A(x)V(t, \xi(x)), \quad (7)$$

где $A(x)$, $U(t, \xi)$, $V(t, \xi)$ и $\xi(x)$ – четыре неизвестные функции, подлежащие определению. Затем данная система уравнений (4), (5) преобразуется в систему уравнений с переменными коэффициентами

$$A(x) \left[\rho_s(x) \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \mu(x) \left(\frac{d\xi}{dx} \right)^2 \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} \right] + (\mu(x)A'(x))' U - A(x)\chi(x)\rho_l^2(x) \left(\frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial V}{\partial t} \right) = 0, \quad (8)$$

$$A(x) \frac{\partial V}{\partial t} + A(x)\chi(x)\rho_l(x)(U - V) = 0 \quad (9)$$

Поскольку система (8), (9) содержит три неизвестные функции, можно наложить три условия для их однозначного определения. В работах [7] был предложен следующий выбор этих условий в форме трёх уравнений:

$$c_t^2(x) \left(\frac{d\xi}{dx} \right)^2 = 1, \quad (10)$$

$$\frac{dc_t}{dx} + 2 \frac{c_t}{A} \frac{dA}{dx} + \frac{c_t}{\rho_s} \frac{d\rho_s}{dx} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{1}{\rho_s A} \frac{d}{dx} \left(\rho_s c_t^2 \frac{dA}{dx} \right) = P, \quad (13)$$

где P – произвольная константа. При выполнении условий (10)-(13) система уравнений (8), (9) сводится к системе уравнений вида с постоянными коэффициентами при старших производных

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} - PU - \omega(x)\varepsilon(x) \left(\frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial V}{\partial t} \right) = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \omega(x)(U - V) = 0, \quad (15)$$

где $\omega(x) = \chi(x)\rho_l(x)$, $\varepsilon(x) = \frac{\rho_l(x)}{\rho_s(x)}$.

Из системы уравнений (14), (15) следует существование затухающих бегущих волн (в частности, монохроматических бегущих волн). Если волна не монохроматическая, мы можем использовать преобразование Фурье или Лапласа для анализа формы волны. Тем не менее, волны, распространяющиеся в противоположных направлениях, не взаимодействуют между собой.

Уравнение (10) называется уравнением эйконала [8, 9] и определяет переход к фазе волны (для определенности взята волна, распространяющаяся вправо) или время прохождения

$$\xi = \int_{x_0}^x \frac{dy}{c_t(y)}. \quad (16)$$

Уравнение (11) определяет связь между амплитудой волны и акустической жесткости пористой среды ($\rho_s(x)c_t(x)$)

$$A(x) = \frac{const}{\sqrt{\rho_s(x)c_t(x)}}. \quad (17)$$

и эта формула совпадает со знаменитым законом Грина (для жидких сред в случае постоянстве плотности), известным из закона сохранения потока энергии в средах с медленно меняющимися параметрами [10, 11]. Отметим, что здесь мы не накладываем условие на медленное изменение среды с глубиной.

Заключение

Многие породы являются сложным для изучения объектом, причем эта сложность во многом обусловлена наличием трещиноватости и пористости. В нашей работе в рамках континуальной теории фильтрации рассмотрено распространение сейсмических поперечных волн в горной породе, содержащей параметры флюидонасыщенности и пористости. Проблема существования бегущих волн в неоднородной пористой среде важна для объяснения распространения волн на большие расстояния. Рассмотрены новые решения волновых уравнений с переменными коэффициентами, описывающих бегущие SH волны в пористой среде с учетом диссипации энергии. Такие решения получены с использованием методов преобразования, когда уравнения с переменными коэффициентами могут быть сведены к уравнению с постоянными коэффициентами.

Исследования Имомназарова Б.Х. и Имомназарова Х.Х. выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Blokhin A. M., Dorovsky V. N. Mathematical modelling in the theory of multivelocity continuum. N. Y.: – Nova Science Publ. – 1995.
2. Ихсанова Р. А., Молокович Ю. М. Прямолинейно-параллельная фильтрация с учетом конечной скорости распространения возмущений // Исследования по подземной гидромеханике. Вып. 9. – Казань – 1987, С. 72–78.
3. Имомназаров Х. Х. Численное моделирование некоторых задач теории фильтрации для пористых сред // Сиб. журн. индустр. матем. – 2001. № 4:2. С. 154 –165.

4. Bluman G. On mapping linear partial differential equations to constant coefficient equations // SIAM J. Appl. Math. – 1983. - V. 43. - P. 1259–1273.
5. Varley E.; Seymour B. A method for obtaining exact solutions to partial differential equations with variable coefficients // Stud. Appl. Math. – 1988. – V. 78. - P. 183–225.
6. Grimshaw R.; Pelinovsky D.; Pelinovsky E. Homogenization of the variable-speed wave equation // Wave Motion. – 2010. V. 47. - P. 496–507.
7. Didenkulova I.; Pelinovsky E.; Soomere T. Long surface wave dynamics along a convex bottom // J. Geophys. Res. Ocean. – 2009. – V. 114. - C07006.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1973. – 716 с.
9. Эванс Л. К. Уравнения с частными производными //Серия: Университетская серия– Издательство: Тамара Рожковская, 2003.
10. Brekhovskikh L. M. Waves in Layered Media; Academic Press: – Cambridge MA. - USA, 1976. - ISBN 9780323161626.
11. Mei C. C. The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves. - World Scientific: Singapore, 1989.

© Б. Х. Имомназаров, Х. Х. Имомназаров, И. К. Искандаров, 2026

А. И. Крылова^{1✉}, Н. А. Лаптева²

Схематизация Обь-Иртышского бассейна. Предварительные результаты моделирования

¹Институт Вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор" Роспотребнадзора,
Новосибирская область, р.п. Кольцово, Российская Федерация
e-mail: alla@climate.sccc.ru

Аннотация. В работе представлено построение схематизированной гидрографической сети Обь-Иртышского бассейна как основы концептуальной гидрологической модели. Согласно модельной сети водосбора составлена карта маршрутизации, которая определяет для каждой пространственной ячейки сетки в какую соседнюю ячейку передается речной сток. Построенная карта-схема модельной гидрографической сети реки Обь и ее подбассейнов позволила провести первые численные эксперименты по расчету речного стока на основе новой версии концептуальной гидрологической модели в нижнем бьефе Бухтарминской ГЭС и нижнем течении р. Обь от гидропоста Белогорье до замыкающего створа водосбора гидропоста Салехард.

Ключевые слова: Обь-Иртышский бассейн, схематизация гидрографической сети, концептуальная гидрологическая модель, речной сток

A. I. Krylova^{1✉}, N. A. Lapteva²

Schematics of the Ob-Irtysh basin. Preliminary simulation results

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector" of Rospotrebnadzor,
Novosibirsk Region, Koltsovo, Russian Federation
e-mail: alla@climate.sccc.ru

Abstract. The paper presents the construction of a schematized hydrographic network of the Ob-Irtysh basin as the basis for a conceptual hydrological model. According to the model catchment network, a routing map has been created that determines which neighboring grid cell receives river flow each spatial grid cell. The constructed map-scheme of the model hydrographic network of the Ob River and its sub-basins allowed the first numerical experiments to calculate river flow based on a new version of the conceptual hydrological model in the lower reaches of the Bukhtarminskaya HPP and the lower reaches of the Ob River from Belogorye to the Ob River outlet.

Keywords: Ob-Irtysh basin, schematization of hydrographic network, conceptual hydrological model, river flow

Введение

В связи с климатическими изменениями в последние десятилетия в Арктическом регионе, в частности, в Северном Ледовитом океане (СЛО) наблюдается увеличение приземной температуры воздуха и осадков, что повлияло на режим

стока арктических рек, в том числе самых крупных сибирских рек: Оби, Енисея, Лены [1 - 4].

Река Обь является одной из крупнейших арктических рек, приносящая почти 15% пресной воды в СЛО [5]. Сложный гидрологический режим реки обусловлен в основном снеготаянием весной, осадками и испарением летом и осенью. Его изменение может повлиять на климат за счет увеличения притока пресной воды в СЛО [6, 7].

Для изучения влияния изменения баланса пресной воды в СЛО на климатическую систему необходимо включать модель речного стока, чтобы замкнуть гидрологический цикл. Для этой цели были разработаны концептуальная гидрологическая модель и ее новая версия, которая успешно была применена к бассейну р. Лена [8, 9]. Оценка влияния изменения климата на гидрологию Обь-Иртышского бассейна на основе концептуальной модели требует построения модельной гидрографической сети в качестве первого этапа моделирования годовых и сезонных потоков в масштабе бассейна. Водосборный бассейн р. Обь, как типично равнинной реки, имеет природные особенности: малые уклоны, сложные поймы рек, широкие заболоченные долины, которые представляют основные трудности для моделирования речного стока. Встает вопрос в рамках исследования: возможно ли продолжить моделирование крупномасштабной гидрологии бассейна р. Обь с целью определения его реакции на глобальное потепление на основе концептуальной гидрологической модели, как это имело место для бассейна р. Лена. Прежде чем пытаться ответить на вопрос как гидрология бассейна взаимодействует с поверхностным водотоком через речную сеть, необходимо ее схематизировать.

Модельная схематизация бассейна

Основой концептуальной гидрологической модели является карта маршрутизации или карта направлений движения потоков пресной речной воды с речного водосбора в океан. Ее построение осуществляется на основе цифровой модели рельефа поверхности водосбора. Качество расчетов гидрографов стока в замыкающем створе речного бассейна в большой степени зависит от согласованности площади модельного водосбора с его реальной площадью. В противном случае могут возникнуть ошибки в представлении объема воды и времени движения потока.

Схематизация Обь-Иртышского бассейна и построение его дренажной сети выполнены на основе цифровой модели рельефа, полученной по глобальным данным радарной интерферометрической съемки SRTM30 [10]. Фрагмент данных, включающий бассейн, был преобразован с помощью метода геостатистического моделирования кригинг в массив топографических данных на регулярной сетке разрешением $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$. Построение такой гидрологически-корректной цифровой модели, в которой форма и направление смоделированных потоков были бы близки к реальным, выполнялось с помощью программ вычисления файлов направлений и кумулятивного стока для каждой ячейки сетки. Направления стока формируются с помощью метода D8 (Deterministic Eight-Neighbor), а

определение кумулятивного стока – это вычисление числа всех ячеек, чей сток попадает в ячейку, лежащую вниз по склону. Ячейки с самым большим числом кумулятивного стока образуют линии, выделяющиеся на фоне всех остальных ячеек. Эти линии - главные для создания сети водотоков. После преобразования данных по методу кригинг необходима была ручная доработка.

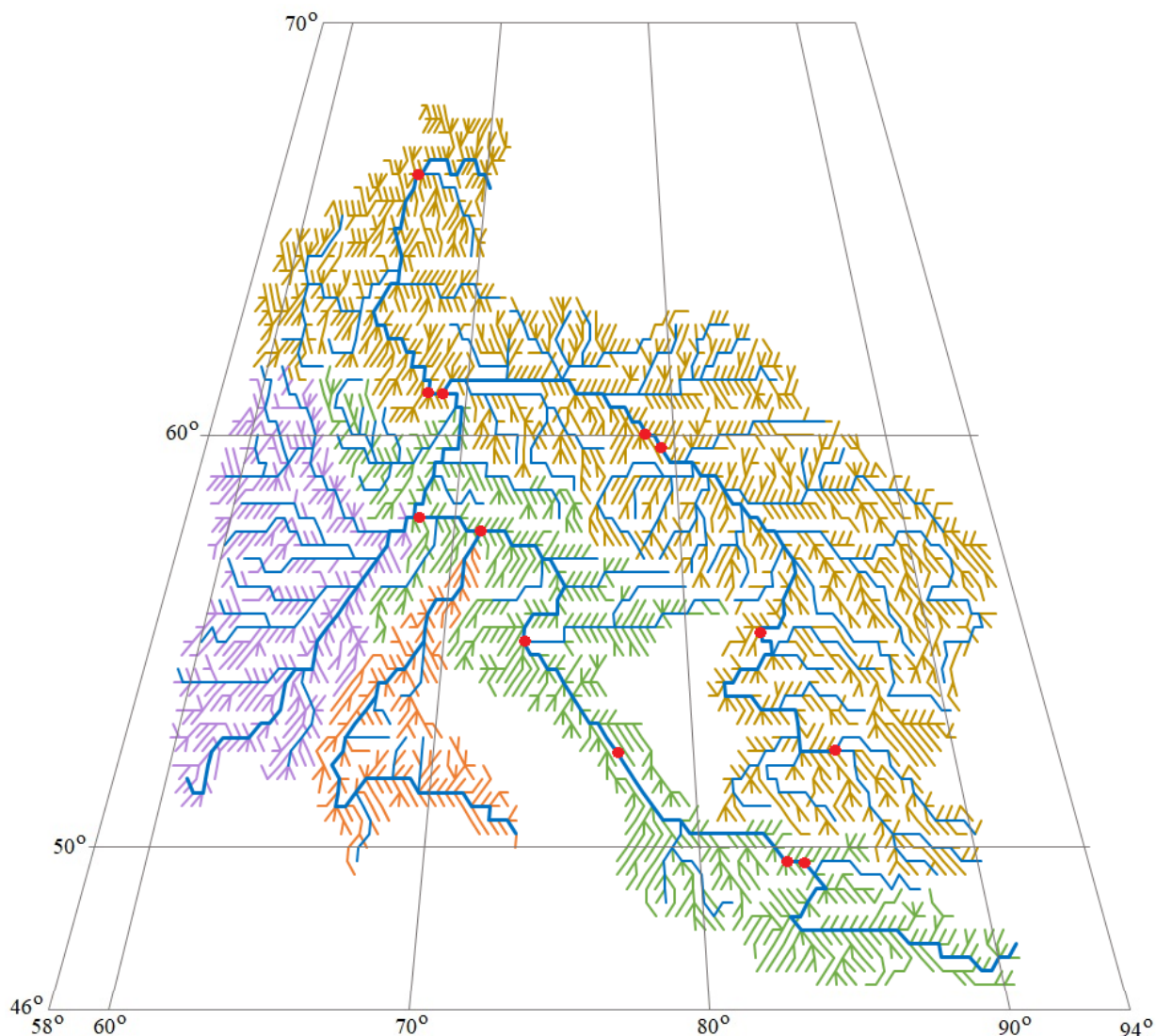


Рис. 1. Схематизация Обь-Иртышского бассейна на сетке $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$

Для этой цели использовались топографические карты масштабов 1:50000, 1:1000000 для определения и уточнения высот рельефа речных ячеек, представляющих основной путь, и поверхностных ячеек, окружающих речные ячейки.

На рис. 1 представлена построенная карта-схема модельной гидрографической сети реки Обь и ее подбассейнов. Для Обь-Иртышского бассейна общее число расчетных ячеек разрешением $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ составило 3980 ячеек, из них 1122 ячейки приходятся на речные. Модельное речное дерево бассейна включает

80 притоков, основными из которых являются Бия, Катунь, Томь, Чулым, Иртыш, Ишим, Тобол.

Одна из проблем, которая проявилась после схематизации, состоит в том, что высокая степень меандрирования рек Оби и Иртыша слабо отражается сеткой $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ (таблица), хотя площадь модельного водосбора достаточно близка к площади реального. В таблице коэффициент извилистости – это отношение длины модельного участка к реальной длине и напрашивается вывод что сетка груба для определенных участков рек.

Таблица. Расстояние между гидропостами по Иртышу и Оби

Маршрут между гидропостами	Расстояние, км		Коэффициент извилистости
	реальное	модельное	
Бухтарминская ГЭС – Усть-Каменогорская ГЭС	150	68	0,46
Усть-Каменогорская ГЭС – Павлодар	550	545	0,99
Павлодар – Омск	570	411	0,72
Омск – Екатеринбург	300	265	0,88
Омск – Тобольск	1219	771	0,63
Тобольск – Ханты-Мансийск	630	419	0,66
Ханты-Мансийск – Белогорье	30	36	1,21
Ханты-Мансийск – Салехард	1000	848	0,85
Прохоркино – Александровское	195	120	0,62
Белогорье – Салехард	970	812	0,84

Предварительные численные эксперименты

В данной работе представлены первые результаты по моделированию речного стока в нижнем бьефе Бухтарминской ГЭС, расположенной на территории Казахстана, и в нижнем течении р. Обь от гидропоста Белогорье до замыкающего створа бассейна гидропоста Салехард на основе новой версии концептуальной гидрологической модели.

Расчеты расхода в нижнем бьефе ГЭС показывают, что модельная волна опережает наблюдаемую почти на месяц. Кроме этого, ее амплитуда значительно больше наблюдаемой (рис. 2). Одно из решений этой проблемы - учет ежегодных специальных длительных попусков из водохранилища во время половодья для затопления пойм и лиманное орошение с целью создания устойчивых урожаев кормов и нереста рыбы. Для этого необходимо иметь информацию о попусках, которой мы пока не располагаем.

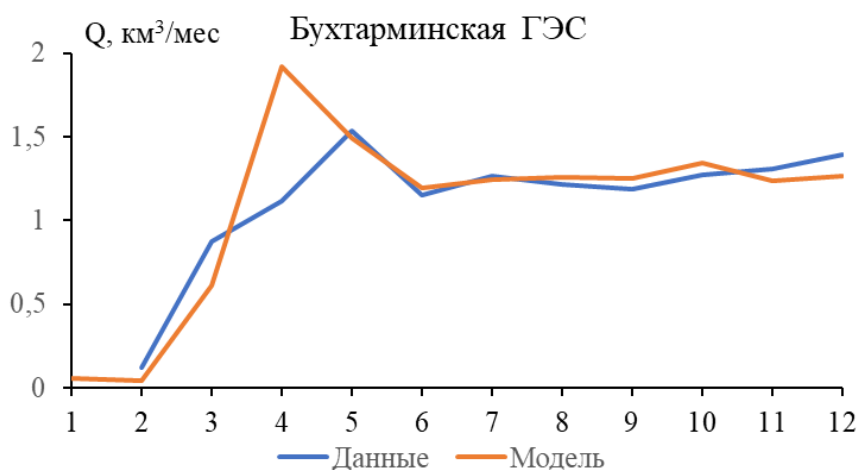


Рис. 2. Сравнение модельного и наблюдаемого расходов, осредненных за период с 1980 по 1985 гг., на нижнем бьефе Бухтарминской ГЭС.

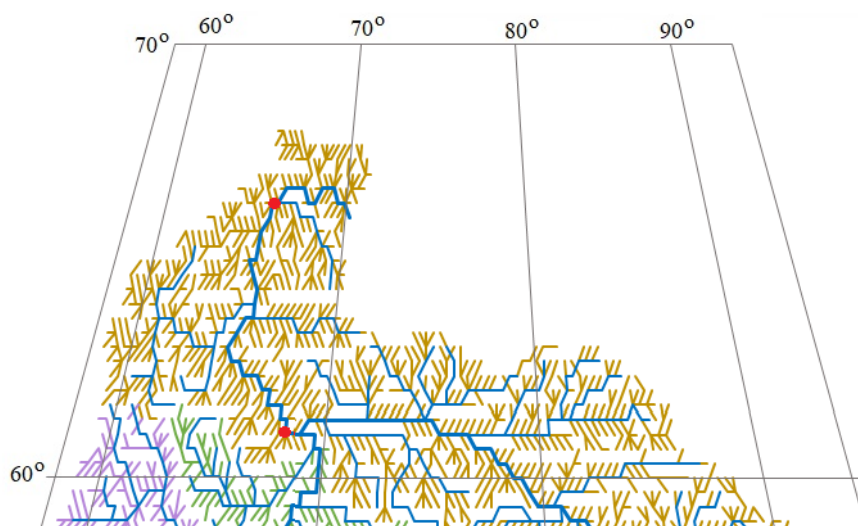


Рис. 3. Участок низовья реки Обь «Белогорье – Салехард»

Моделирование речного стока в нижнем течении р. Обь рассматривалось как решение начально-краевой задачи с начальными данными в Белогорье. Поступление речного стока в область исследования из верхнего течения реки определяется суточным расходом, измеренным на гидропосту Белогорье [11]. Для сравнения модельного расхода с наблюдаемым использовались данные о расходе, измеренные в Салехарде. На рис. 3 представлено расположение гидропостов на карте-схеме, расстояние между которыми по реке около 950 км. Боковой приток к реке в исследуемой области рассчитывался по однопараметрической линейной резервуарной модели [8]. Атмосферные данные, используемые в качестве входных (осадки, испарение, приземная температура воздуха) получены из архива реанализа MERRA [12]. Построенная карта-схема маршрутизации позволяет всем ячейкам бассейна вносить свой вклад в боковой приток.

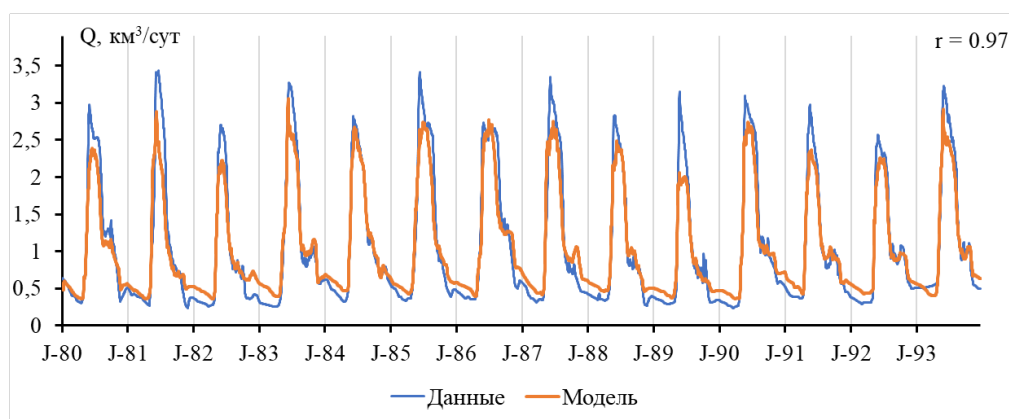


Рис. 4. Сравнение модельного и измеренного годового хода расхода на г/п Салехард для периода 1980 – 1993 гг.

Для всех смоделированных расходов воды, как и для измеренных, за 14-летний период с 1980 г. по 1993 г. четко проявлен характер годового цикла водного режима бассейна (период зимней межени: январь-март, ноябрь-декабрь; весеннее половодье: апрель-июль; летне-осенние паводки: август-октябрь) (рис. 4). Речной сток моделируется достаточно хорошо (коэффициент корреляции r равен 0.97), хотя модель недооценивает максимальный расход в половодье.

Заключение

Данное исследование показывает, что можно смоделировать речной сток сложного Обь-Иртышского бассейна на основе концептуальной гидрологической модели, используя натурные измерения расхода воды из архива R-ArcticNet для стока вверх по течению от гидропоста Белогорье. Необходимо в дальнейшем провести тесты на чувствительность к данным об осадках из архива MERRA, которые являются ключевым фактором в модели. Необходимо исследовать возможность учета в модели взаимодействия поверхностного стока со сложными поймами и болотными массивами, расположенными в междуречье. Совместно с результатами исследования [13], в котором изучалось гидродинамическое моделирование речного стока нижней Оби, моделирование на основе концептуальной гидрологической модели может внести свой вклад в понимание гидрологического режима Обь-Иртышского бассейна.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект FWNM - 2025 - 0003).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Doscher R., Vihma T., Maksimovich E. Recent advances in understanding the Arctic climate system state and change from a sea ice perspective: A review // Atmos. Chem. Phys. - 2014. - V. 14 - №7. - P. 10929-10999. DOI: 10.5194/acpd-14-10929-2014.

2. Peterson B. J., Holmes R. M., McClelland J. W., Vorosmarty C. J., Shiklomanov I. A., Shiklomanov A. I., Lammers R. B., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // *Science*. - 2002. - V. 298. - P. 2171–2173. DOI: 10.1126/science.1077445.
3. McClelland J. W., Holmes R. M., Peterson B. J., Stieglitz M. Increasing river discharge in the Eurasian Arctic: Consideration of dams, permafrost thaw, and fires as potential agents of change // *J. Geophys. Res.* - 2004. - V. 109. - D18102. DOI: 10.1029/2004JD004583.
4. Overeem I., Syvitski J. P. M Shifting discharge peaks in Arctic rivers, 1977–2007 // *Geogr. Ann. Ser. Phys. Geogr.* - 2010. - V. 92 - №2. - P. 285–296. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2010. 00395. x
5. Serreze M. C., Barrett A. P., Slater A. G., Woodgate R. A., Aagaard K., Lammers R. B., Steele M., Moritz R., Meredith M., Lee C. M. The large-scale freshwater cycle of the Arctic // *J. Geophys. Res.* - 2006. - V. 111. - C11010. DOI: 10/1029/2005JC003424.
6. Shiklomanov A. I., Lammers R. B. Record Russian river discharge in 2007 and the limits of analysis // *Environ. Res. Lett.* - 2009. - V.4. DOI:10.1088/1748-9326/4/4/045015.
7. Broecker W.S. The great ocean conveyor // *Oceanography*. - 1991. - V.4/2. - P. 79-89. DOI: 10.5670/OCEANOLOG.1991.07
8. Кузин В. И., Лаптева Н. А. Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна // *Оптика атмосферы и океана*. - 2012. - Т. 25. - № 6. - С. 539-543.
9. Krylova A. I., Lapteva N. A. Modeling Long-Term Dynamics of River Flow in the Lena River Basin Based on a Distributed Conceptual Runoff Model // *Water Resources*. - 2024. - V. 51. - No. 4. - P. 393–404. DOI:10.1134/S0097807824700854.
10. [Электрон. Рес.]: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505>
11. [Электрон. Рес.]: <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>
12. [Электрон. Рес.]: <https://gmao.dsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA>
13. Biancamaria S., Bates P.D., Boone A., Mognard N. M. Large-scale coupled hydrologic and hydraulic modelling of the Ob River in Siberia // *Journal of Hydrology*. - 2009. - V. 379. - P. 136–150.

© А. И. Крылова, Н. А. Лаптева, 2026

Д. Д. Лаврентьев^{1✉}, М. С. Хайретдинов², О. А. Копылова²

Частотно-векторные характеристики транспортных колебаний в разных рабочих режимах

¹Новосибирский Государственный Технический Университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения
РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: danil-lavrentev-2000@mail.ru

Аннотация. Актуальность задачи обусловлена необходимостью разработки программно-алгоритмических средств пассивной локации транспортных объектов по их сейсмическим колебаниям. Экспериментальные данные получены посредством трехкомпонентных сейсмодатчиков, регистрирующих колебания по взаимортогональным осям X , Y и Z . Выполнена спектрально-временная обработка данных с применением секционирования записей транспортного шума в режимах работы автомобиля марки «Нива» на месте и в движении. Это позволяет выделять последовательность доминантных частот, определяемых числом оборотов основного двигателя. Выделяемые частоты используются в качестве центральных для адаптивной настройки полосового фильтра Баттерворта. Ключевым результатом программной реализации является построение полярограмм по компонентам X - Y на основе отфильтрованных сейсмограмм и последующий расчет азимутального угла α , определяющего пеленг на источник колебаний. Разработанное решение позволяет повысить точность пеленгации транспортных средств сейсмическим методом.

Ключевые слова: спектральный анализ, сейсмограмма, полосовой фильтр Баттерворта, полярограмма, пеленгация, азимутальный угол

D. D. Lavrentev^{1✉}, M. S. Khayretdinov², O. A. Kopylova²

Frequency-vector characteristics of vehicle vibrations in different operating modes

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: danil-lavrentev-2000@mail.ru

Abstract. The relevance of this work stems from the need to develop software and algorithmic tools for the passive location of vehicles based on their seismic vibrations. Experimental data were acquired using three-component seismic sensors that record ground motion along mutually orthogonal X , Y , and Z axes. Time-frequency processing was carried out by segmenting the vehicle noise records obtained from a «Niva» car operating in both stationary and moving modes. This procedure makes it possible to extract a sequence of dominant frequencies determined by the main engines rotational speed. The extracted frequencies are used as center frequencies for the adaptive tuning of a Butterworth bandpass filter. The key outcome of the software implementation is the construction of polar diagrams from the X - Y components using the filtered seismograms, followed by the calculation of the azimuth angle α that gives the bearing to the vibration source. The developed solution improves the accuracy of vehicle direction finding by the seismic method.

Keywords: spectral analysis, seismogram, Butterworth bandpass filter, polarogram, direction finding, azimuth angle

Введение

Проблема геоэкологического мониторинга техногенных шумов, обусловленных возрастающей автомобилизацией, активной строительной и производственной деятельностью, приобретает всё большую актуальность [1]. В связи с этим возникает необходимость в разработке и совершенствовании методов обнаружения и пеленгования источников сейсмических колебаний, в частности, транспортных средств [2]. Одним из современных методов пеленгования является поляризационный, который опирается на трех-координатную взаимоортogonalную регистрацию транспортных сейсмических колебаний в заданной точке. Анализируя параметры получаемого векторного колебания и, прежде всего, ориентацию большой оси эллипса поляризации, можно определять пеленг на источник [4, 5]. Ниже рассматривается задача помехоустойчивой пеленгации на фоне внешних шумов [3] на основе анализа экспериментально записанных сейсмических колебаний, полученных от легкового автомобиля в разных рабочих режимах.

Методы и материалы

Общая постановка задачи пассивной геолокации состоит в следующем. С помощью линейки пространственно-распределенных трехкомпонентных датчиков в земле регистрируется волновое поле, представляемое в виде векторной функции:

$$\bar{A}(x, y, z, t) = \{\bar{A}_k\}[x_k(t_i), y_k(t_i), z_k(t_i)]\}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ – множество дискретных значений функций, $k = 1, 2, \dots, M$ – число датчиков в линейке $[x_k(t_i), y_k(t_i), z_k(t_i)]$. Компонента X ориентируется на север, Y – на восток, Z – вертикальная компонента.

Волновое поле от транспортного источника описывается суммой нестационарных квазигармоник и фонового шума с преобладающей спектральной компонентой, соответствующей частоте вращения основного двигателя. Модель данного колебания задается выражением:

$$x_k(t_i) = A_x(k)h_kL[\cos(\omega_0(t_i - \Delta t_k) + \varphi_x(k)) + n_k(t_i)], \quad (2)$$

Здесь A_x – амплитуда колебания по компоненте X на k -ом датчике, ω_0 – преобладающая в спектре колебаний частота вращения двигателя, $\varphi_x(k)$ – фаза ее в k -ой точке регистрации для компоненты X , h_k – чувствительность датчика, L – оператор фильтрации сигнала, $n_k(t)$ – внешний шум с корреляционной функцией $r_k(\tau)$.

Трехмерный вектор сейсмических колебаний (1) с учетом моделей колебаний по компонентам в виде (2) представляется в виде набора точек, пространственное

положение каждой из которых характеризуется радиусом-вектором:

$$\vec{A}_i \equiv (x_i, y_i, z_i),$$

Доминирование основной гармоники позволяет моделировать трёхмерное поле, которое будет описываться эллипсоидом рассеяния с наложенными шумами. Ориентация большой оси эллипсоида, встречная фронту волны, задается азимутальным углом α и тангенциальным углом θ . Точность определения азимута связана со степенью компактности эллипсоида, которая оценивается через производную функции:

$$\Delta a/a \sim \left(1 / \frac{\partial[A(x,y)]}{\partial x \partial y}\right). \quad (3)$$

При движении транспорта доминирующие спектрально-временные составляющие излучаемого сигнала (основная частота) могут изменяться во времени, например: при разгоне, работе на месте, включении и выключении зажигания или торможении. В этих условиях для повышения точности и устойчивости к шумам, необходима процедура отслеживания текущей основной частоты – $\omega_0(t)$ с последующим применением полосовой фильтрации на исследуемом участке движения транспорта. С этой целью на каждом последовательном временном интервале анализа выполняется спектрально-временное оценивание: исходная сейсмограмма сегментируется на окна равной длительности, в пределах каждого окна вычисляется преобразование Фурье и по положению максимума амплитудного спектра определяется текущее значение частоты $\omega(t)$. Полученная частота используется в качестве параметра для установки границ полосового фильтра, что позволяет выделить квазигармоническую составляющую на фоне широкополосных шумов и обеспечить более точный поляризационный анализ. Искомая модель сигнала на каждом временном окне представляется в виде:

$$Z(t) = A(t) \cdot \xi(t), \quad (4)$$

где $\xi(t)$ – непрерывный случайный сигнал, $A(t)$ – импульсная функция. Алгоритм спектрально-временного анализа имеет вид:

$$F(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} Z_l(t_n) \exp\left(-i \frac{2\pi n k}{N}\right), l = 1, \dots, L. \quad (5)$$

Здесь $T = N \cdot \Delta t$ – длительность секции, L – число секций длительностью T каждая.

Для улучшения точности пеленгования источника на этапе предобработки применяется цифровая фильтрация на основе оператора L , обеспечивающего подавление шумовой составляющей и извлечение полезного сигнала. В качестве оператора L используется передаточная функция полосового фильтра Баттерворта:

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}}}, \quad (6)$$

где ω_0 – граничная частота, n – порядок фильтра.

Параметры фильтрации настраивались в соответствии с диапазоном, в котором выделяемая частота соответствовала характерным частотам моменту работы на месте. Предварительно был осуществлён спектральный анализ экспериментальных записей движения автомобиля марки «Нива» в режимах работы на месте и в движении, сейсмограммы записывались с 4-х датчиков, на которых фиксировались x , y , z – компоненты.

$$F(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} x_l(t_n) e^{-i \frac{2\pi nk}{N}}, \quad (7)$$

где $x_l(t_n)$ – анализируемый сигнал в рамках временного окна l , где $l = 1, \dots, L$ – количество временных окон, N – количество временных отсчетов в окне. Данный тип анализа позволяет изучать изменение частоты во времени в задаваемых временных диапазонах.

Результаты

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма был проведён эксперимент с использованием трёхкомпонентной сейсмической регистрации. Сейсмодатчики фиксировали колебания, создаваемые движущимся автомобилем марки «Нива», по трём компонентам X , Y и Z . Пространственная схема размещения датчиков относительно траектории движения транспортного средства (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения датчиков

По результатам эксперимента был записан профиль скорости движения автомобиля, отражающий изменение скорости на всём маршруте, участки остановок и полный пройденный путь (рис. 2).

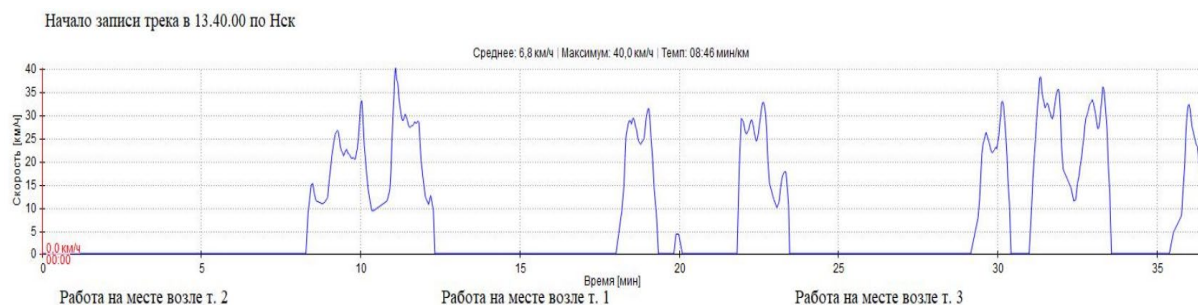


Рис. 2. Трек движения автомобиля

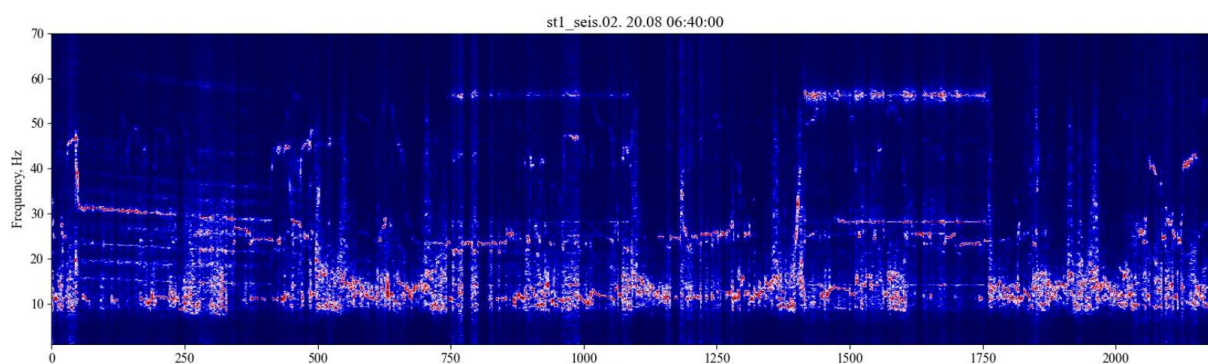


Рис.3. Спектрограмма движения автомобиля

Зарегистрированные сейсмические сигналы загружались в разработанный программный комплекс и подвергались анализу, как на интервалах работы автомобиля на месте с включённым двигателем, так и на участках с постоянным движением. Для каждого анализируемого временного интервала выполнялся спектральный анализ (рис. 4), по результатам которого определялась модальная частота с максимальной амплитудой, соответствующая числу оборотов двигателя: рис. 4.а – спектр работы автомобиля на месте на участке 340-360 с, рис. 4 б – Спектр движения автомобиля на участке 180-240 с. Эти частоты используются в качестве центральных для полосового фильтра Баттерворта, через который пропускались исходные сейсмограммы.

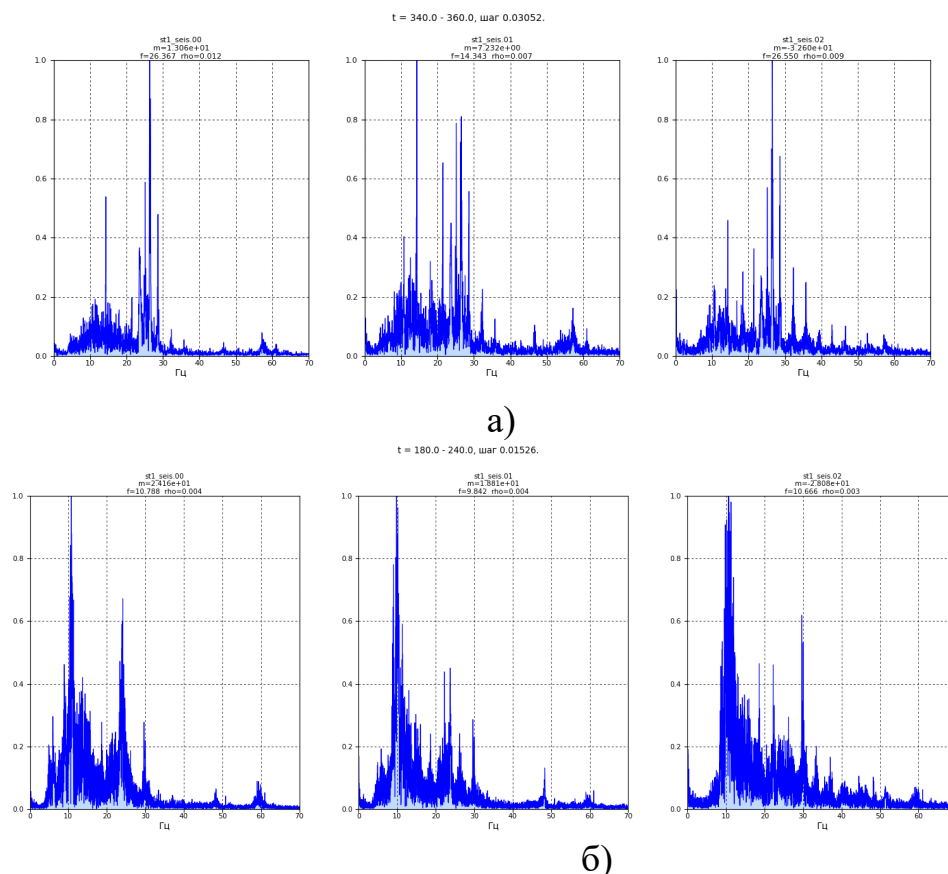


Рис. 4. а) Спектр работы автомобиля на месте на участке 340-360 с
 б) Спектр движения автомобиля на участке 180-240 с

Анализ спектрограмм, полученных для различных режимов функционирования транспортного средства, позволил дифференцировать основные источники шума. В режиме работы на месте доминирующая спектральная составляющая изменялась в диапазоне от 26 до 29 Гц в зависимости от оборотов двигателя. Проведя соотношение спектров с модальной частотой 29 Гц со значениями оборотов в минуту на спидометре, авторы данной работы предположили, что данная частота соответствует моменту работы на месте на оборотах 870 об/мин. При переходе к постоянному движению спектральный состав шума претерпевает существенные изменения, расширяясь в диапазоне от 10 Гц до 45 Гц с разной интенсивностью. Данные частотные компоненты характеризуются преимущественно элементами ходовой части и подвески, а также являются следствием аэродинамического шума и шума шин. Выделяемая основная частота 45 Гц для интервала движения автомобиля соответствует моменту работы на месте при 1344 об/мин.

На основе отфильтрованных в узкой полосе частот сигналов для компонент X и Y строились полярограммы, по которым рассчитывались азимутальные углы α , определяющие направление на источник колебаний [1]. Полярограммы, построенные по прошедшим полосовую фильтрацию данным для 4-х датчиков, иллюстрируется на рис. 5.

Результаты работы поляризационного анализа приведены в таблице 1. Для

выбранного интервала приведены четыре значения – азимутальный угол по исходной полярограмме α_1 и азимутальный угол после полосовой фильтрации α_2 .

Таблица 1

$T(c)$	№ Датчика	α_1	α_2
300-301	st1	33.5°	141.7°
	st2	26.6°	53.3°
	st3	58.8°	149.2°
	st4	2.1°	86.7°

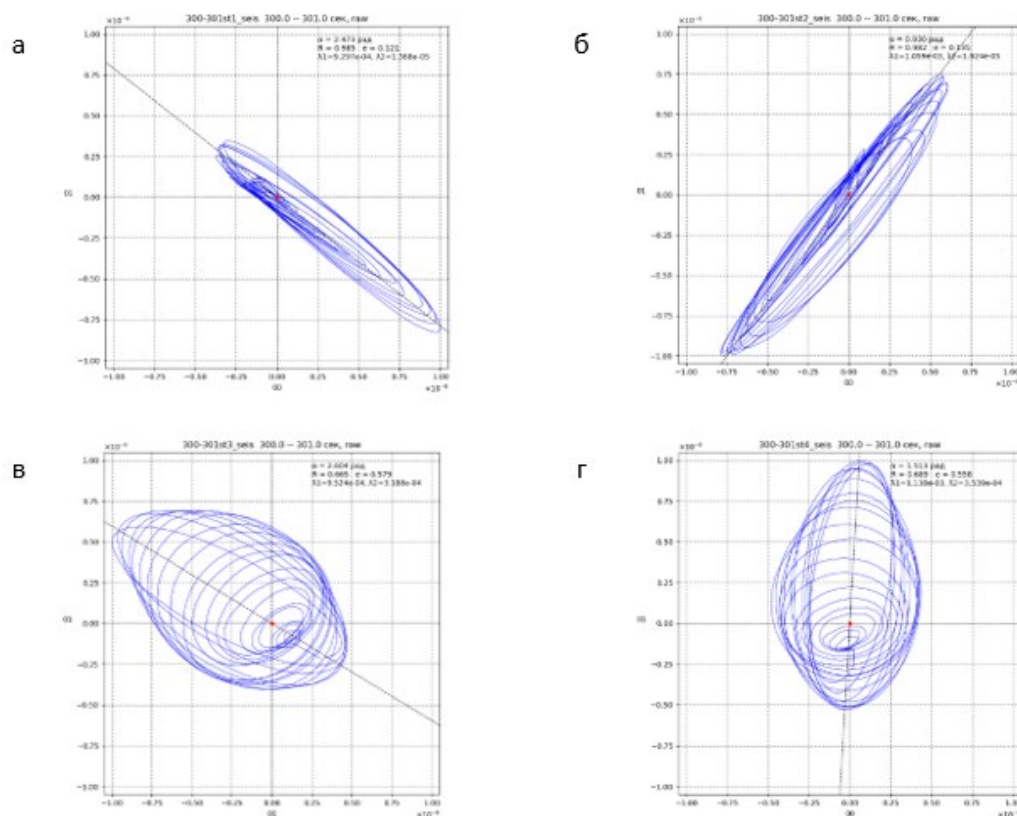


Рис. 5. Полярограммы режима работы на месте в окне 1 секунда с полосовой фильтрацией в интервале 25-27 Гц для датчиков: а) st1; б) st2; в) st3; г) st4

Обсуждение

Узкополосная фильтрация с выбором модальной частоты в качестве центральной, соответствующей числу оборотов двигателя, позволяет выделить когерентную составляющую транспортного колебания, что позволяет улучшить точность определения азимутального угла и снизить погрешность пеленгации.

Заключение

В ходе работы выполнено исследование частотно-векторных характеристик сейсмических колебаний, генерируемых автомобилем в стационарном режиме и

в процессе движения. Разработан и апробирован в натурных условиях алгоритм адаптивной полосовой фильтрации с поляризационным анализом, позволяющий по данным одиночной трёхкомпонентной станции определять азимут на источник.

Спектральный анализ позволил выявить принципиальные различия в частотном составе сигналов для разных режимов работы транспортного средства. Показано, что настройка фильтра на модальную частоту двигателя обеспечивает выделение когерентной составляющей и формирование устойчивых полярограмм, для расчета пеленга на источник. Полученные результаты демонстрируют эффективность спектрально-поляризационного подхода для решения задач пассивной локализации транспортных объектов по их вибрационному фону.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNN-2025-0004

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доброродный В. И., Копылова О. А., Хайретдинов М. С. Обнаружение и пеленгование транспортных объектов в сейсмоакустических системах наблюдения // Вестник СибГУТИ. – 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 3–17.
2. Алямкин С. А., Нежевенко Е. С. Восстановление траектории движущегося объекта в сейсмической системе обнаружения при ограниченном количестве датчиков // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 2. – С. 31–39.
3. Коваленко А. О., Кузичкин О. Р., Суржик Д. И., Быков А. А. Фильтрация и обработка сейсмических сигналов движения транспортных объектов. // Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТНОП–2020) : сб. материалов VIII Междунар. науч.-техн. конф., Белгород, 24–25 сент. 2020 г. – Белгород, 2020. – С. 291–294.
4. Yuan S., Bernauer F., Wassermann J., Martin E. R., Igel H. Single-station vehicle tracking using six-component seismic measurements: A comparative study with array-based methods // Seismica. – 2025. – V. 4. No. 2. – DOI: 10.26443/seismica.v4i2.1500.
5. Кулеш М. А. Мгновенные поляризационные свойства трехкомпонентных сигналов в базисе вейвлетов // Вестник Самарского государственного университета. Естественная серия. – 2008. – № 2 (61). – С. 182–194.

© Д. Д. Лаврентьев, М. С. Хайретдинов, О. А. Копылова, 2026

С. В. Михайлюта^{1✉}, А. А. Леженин², Г. Г. Дульцева³

Загрязнение атмосферного воздуха г. Красноярска за последние 40 лет (с 1988 по 2025 гг.) по показателю ИЗА₅

¹Ассоциация Экологических Расследований, г. Красноярск, Российская Федерация,

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: mikhailuta@gmail.com

Аннотация. Выполнен анализ многолетней динамики индекса загрязнения атмосферы (ИЗА₅) в г. Красноярске за период 1988–2025 гг. на основе официальных данных государственных докладов. Показано, что максимальное значение ИЗА₅ (≈65) наблюдалось в 1991 г., что соответствует «опасному уровню». После спада в 1990-е годы, связанного с сокращением производства, с 2000 г. индекс стабилизировался на уровне «очень высокого» загрязнения (>14). В 2024 г. ИЗА₅ превысил 22, вернувшись к значениям 1997 г. Установлено, что 45% индекса формируется бенз(а)пиреном, 32% – формальдегидом. Выявлено несоответствие между составом реальных выбросов (более 28 канцерогенов суммарной массой >5,2 тыс. т/год) и перечнем веществ, измеряемых на стационарных постах (6 канцерогенов, 42 т/год). Сделан вывод о необходимости расширения системы мониторинга, учёта вторичных загрязнителей и закрепления в законодательстве целевых индикаторов качества воздуха.

Ключевые слова: индекс загрязнения атмосферы ИЗА₅, мониторинг качества воздуха, Красноярск, бенз(а)пирен, формальдегид

S. V. Mikhailuta^{1✉}, A. A. Lezhenin², G. G. Dultseva³

Urban air pollution in Krasnoyarsk over 40 years (1988–2025): trends in the API5 index

¹Ecological Research and Investigation Association, Krasnoyarsk, Russian Federation

²The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

³V. V. Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: mikhailuta@gmail.com

Abstract. The long-term dynamics of the Air Pollution Index (API5) in Krasnoyarsk for the period 1988–2025 was analyzed using official data from state environmental reports. The maximum API5 value (≈65) was observed in 1991, corresponding to a “hazardous” pollution level. After a decline in the 1990s due to reduced industrial output, the index stabilized after 2000 at a “very high” pollution level (>14). In 2024, API5 exceeded 22, returning to values recorded in 1997. Benz(a)pyrene accounts for 45% of the index, and formaldehyde for 32%. A significant discrepancy was found between the actual emissions (over 28 carcinogens with a total mass >5,200 tons/year) and the substances measured at fixed monitoring stations (6 carcinogens, 42 tons/year). The study concludes that the monitoring system must be expanded to include a broader range of pollutants and secondary contaminants, and that legally binding air quality targets are needed.

Keywords: urban air pollution, Air Pollution Index API5, air quality monitoring, Krasnoyarsk, benzo(a)pyrene, formaldehyde

Введение

Степень загрязнения атмосферного воздуха в городе зависит от содержания в нем вредных веществ в количествах опасных для здоровья. При этом с выбросами промышленных предприятий и иных источников каждую секунду в воздух поступают сотни загрязняющих веществ (ЗВ). Так, например, в сводных томах предельно допустимых выбросов для г. Красноярска [1] учтено около 240 поллютантов [2] (рис.1).

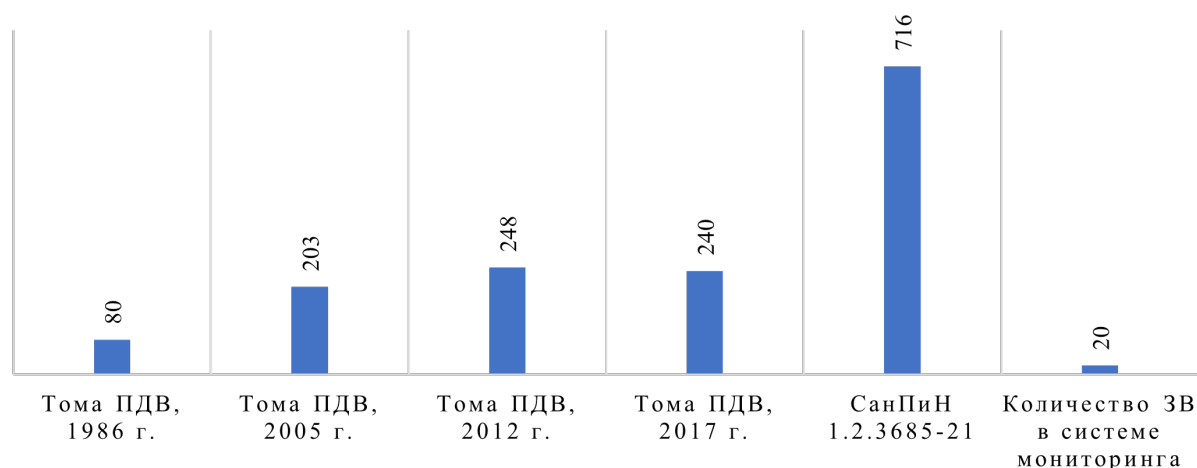


Рис. 1. Количество ЗВ, учтенных при разработке сводных нормативов ПДВ в г. Красноярске, в сравнении с общим количеством опасных для здоровья веществ [3] и числом ЗВ, измеряемых на сетях мониторинга

Можно видеть (рис.1), что при разработке нормативов выбросов учтено только около 1/3 от общего числа вредных веществ, для которых установлены ПДК [3], а в системе регулярных государственных наблюдений Росгидромета – только 8% от количества веществ, официально зарегистрированных в выбросах промышленных предприятий и иных источников в г. Красноярске [4]. При этом по результатам регулярных наблюдений на стационарных постах мониторинга за концентрациями вредных веществ в воздухе в г.Красноярске ежегодно формируется и издается государственный доклад [5], содержащий характеристику качества воздуха [6] по пяти веществам с наибольшими средними за год концентрациями.

Целью данной работы является анализ индекса загрязнения атмосферы в г. Красноярске с 1988 по 2025 гг.

Методы и материалы

Для оценки характеристик качества воздуха в городах России принято использовать так называемый индекс загрязнения атмосферы (ИЗА₅) [6]. ИЗА₅ — это показатель, который дает обобщенную характеристику загрязнения воздуха

в городе за длительный период, обычно за год, и учитывает концентрации пяти наиболее значимых загрязняющих веществ, которые вносят наибольший вклад в загрязнение воздуха в конкретном городе или регионе. Его расчет [6] учитывает превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) для учитываемых веществ и их класс опасности:

$$I(n) = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_{\text{ср}i}}{\text{ПДК}_{\text{с.г.}i}} \right)^{c_i}, \quad (1)$$

где $q_{\text{ср}i}$ – средняя за год концентрация ЗВ, $\text{ПДК}_{\text{с.г.}i}$ – годовой стандарт качества [3], c_i – показатель степени для загрязняющих веществ, равный 1,5; 1,3; 1,0 и 0,85 соответственно для 1, 2, 3 и 4-го классов опасности.

С использованием официальной информации, опубликованной в государственных докладах [5] с 1988 по 2025 гг. выполнена оценка изменения индекса загрязнения атмосферы ИЗА₅ в г. Красноярске за последние 40 лет.

Результаты

На рис.2 представлена динамика индекса загрязнения атмосферы в г.Красноярске с 1988 года.

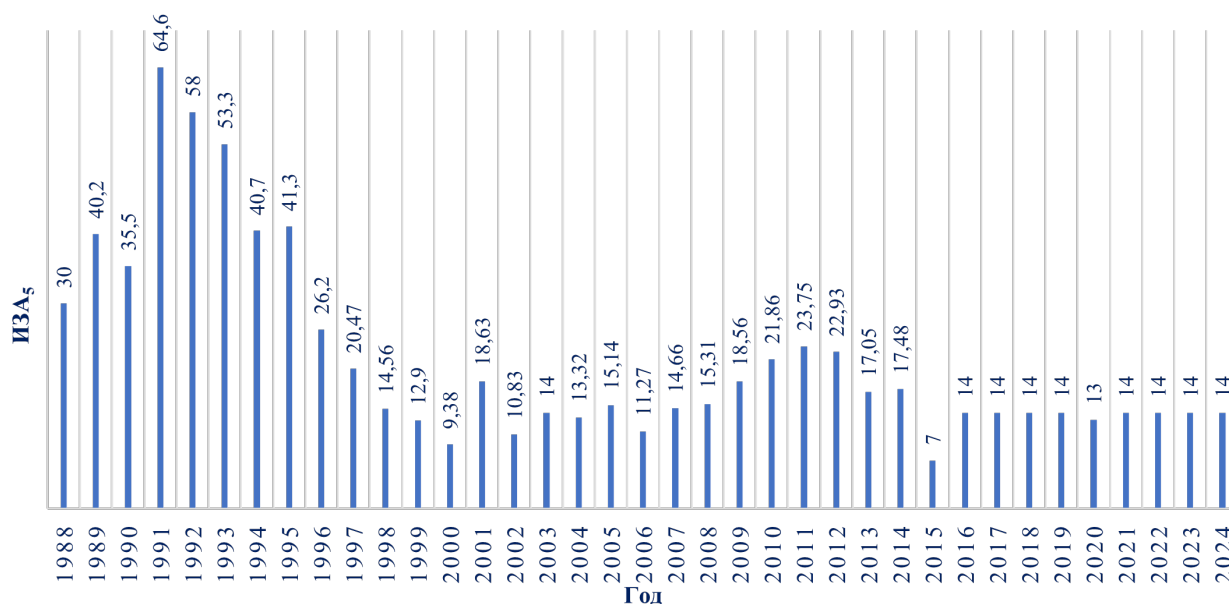


Рис. 2. Изменение значений ИЗА₅ в г. Красноярске, 1988–2024 гг.

Анализ рисунка показывает, что что максимального значения (≈ 65) ИЗА₅ в г. Красноярске достигал в 1991 году. Значение индекса загрязнения атмосферы (ИЗА₅), превышающее 14, относится к уровню «очень высокий» и неблагоприятный для здоровья. Это состояние также классифицируется как «опасный уровень» [6]. Дальнейшее снижение индекса загрязнения, вероятно, связано с сокращением объёмов производства. С 2000 года происходит рост и стагнация значений ИЗА₅. При этом с 2016 года в государственных докладах прекращена

публикация абсолютных значений индекса, с единственным указанием, что он больше 14. С 2019 года в городах России и в г. Красноярске начал реализовываться федеральный проект “Чистый воздух”, имеющий цель снижения нагрузки со стороны вредных выбросов на атмосферу в городах. В результате, согласно докладу [5, стр. 33–34], в состав ИЗА₅ в г. Красноярске входят бенз(а)пирен, формальдегид, стирол, гидрохлорид и взвешенные вещества. При этом среднегодовая концентрация для бенз(а)пирена (1-й класс опасности (КО)) составила 4,6 ПДК_{с.г.}, для формальдегида (2КО) – 4,5 ПДК_{с.г.}, для стирола (2КО) – 1,9 ПДК_{с.г.}, для гидрохлорида (2КО) – 1,6 ПДК_{с.г.}, и для взвешенных веществ (3КО) – 1,2 ПДК_{с.г.}. По абсолютному значению, согласно соотношению (1), значение ИЗА₅ в г. Красноярске в 2024 году составило >22.

Таким образом, к 2025 году состояние и загрязнение атмосферного воздуха в г. Красноярске находится на уровне 1997 года. При этом 45% значения индекса ИЗА₅ приходится на бенз(а)пирен, 32% – на формальдегид, стирол – 9%, гидрохлорид – 8% и взвешенные вещества – 6%.

Как было отмечено выше, в системе наблюдений на государственных стационарных постах мониторинга Росгидромета в г. Красноярске используется далеко не полный перечень показателей (ЗВ) для измерений их содержания в воздухе. Например, согласно сводным томам ПДВ [1], в атмосферный воздух г. Красноярска ежесекундно поступает более 28 канцерогенных веществ, годовой объём выбросов для которых превышает 5,2 тыс. тонн в год. При этом на постах измеряют концентрации только 6 канцерогенов (свинец, бенз(а)пирен, бензол, стирол, формальдегид и этилбензол), общая масса выбросов которых составляет только 42 т/год. Более 5000 тонн канцерогенов в год бесконтрольно рассеиваются в воздушной среде города.

Учет только пяти загрязняющих веществ для оценки состояния и загрязнения атмосферного воздуха в городах при неполном учете состава выбросов и не согласованной с этим составом системе мониторинга создает опасные условия для здоровья населения и препятствует достижению целевых показателей для уменьшения вредных воздействий.

Неполный учет карбонильных соединений и ПАУ, а также металлов, включая шестивалентный хром, при отборе и анализе проб атмосферного воздуха на стационарных постах в городах не позволяет достигать адекватности базы данных для фотохимических моделей в задачах описания рассеивания и трансформации загрязняющих веществ в воздухе и, как следствие, препятствует поиску оптимальных управленческих решений для снижения загрязнения воздуха в городах с целью охраны здоровья населения.

Заключение

В процессе переноса и рассеивания примесей в воздушном бассейне города на всем пути от источников до постов мониторинга могут протекать фотохимические трансформации с образованием вторичных загрязняющих веществ в

атмосфере. При этом корректный учет состава выбросов на подконтрольных территориях имеет исключительно важное значение для организации и адекватности наблюдений за состоянием и загрязнением атмосферного воздуха.

При этом до настоящего времени в РФ не установлены целевые индикаторы эффективности государственной экологической политики в области охраны атмосферного воздуха, учитывающие информацию системы мониторинга о качестве воздуха в городах, а это, в свою очередь, требует внесения дополнений в статьи федерального законодательства.

Благодарности

Исследования выполнены по заказу палаты экологических организаций Гражданской ассамблеи Красноярского края, в рамках госзадания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Отчет по 2-му этапу государственного контракта №35 от 13.06.2017 года о выполнении «Корректировки сводного тома предельно допустимых выбросов для г. Красноярска», Книга 1. Часть 1. ООО «Институт проектирования, экологии и гигиены», Санкт-Петербург, 2017. – 239 с
2. ГОСТ Р 56828.38-2018. Наилучшие доступные технологии. Окружающая среда. Термины и определения: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 мая 2018 г. № 269-ст. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 36 с.
3. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 №2 (ред. от 24.12.2025) «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
4. <http://krasecology.ru/About/Work> (Дата обращения 18.05.26)
5. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2024 году». – Красноярск, 2025. – 387 с.
6. РД 52.04.667-2005. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию: утвержден Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды 01.02.2006. – Москва: Метеоагентство Росгидромета, 2006. – 60 с.

© С. В. Михайлюта, А. А. Леженин, Г. Г. Дульцева, 2026

*А. В. Михеева*¹✉

Динамика корреляционного параметра в области подготовки землетрясений по данным глобального каталога ВJI

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: anna@omzg.sscc.ru

Аннотация. По данным мирового китайского каталога землетрясений ВJI с помощью алгоритма нахождения аномалий K_{COR}^0 (коэффициента парной корреляции классического крипекса Cr_0 и магнитуды M_S), предваряющих сильнейшие ($M_S \geq 8$) и умеренные ($M_S \geq 4.6$) землетрясения, исследована динамика состояния среды накануне этих событий. Установлена закономерность длительных аномалий накануне сильнейших событий в границах дальней зоны влияния подготовки очага R_d , радиус которой рассчитывается с учетом распределении напряжений в упругопластической среде. В окрестностях R_d алгоритмом сканирования всего каталога выявлена закономерность (в 100% случаев) значительно более протяженных во времени (от полутора месяцев до 26 лет) положительных аномалий K_{COR}^0 перед сильнейшими землетрясениями каталогов в случае использования классического крипекса $Cr_0 = M_S - m_b$ в сравнении с методом, использующим нормированный крипекс (от 25 дней до 3 лет). Это может свидетельствовать об установлении длительного упругопластического состояния среды в R_d -области подготовки очагов крупных землетрясений.

Ключевые слова: каталоги и базы данных землетрясений, параметры сейсмогеодинамического процесса, тектонические обстановки

*A. V. Mikheeva*¹✉

Dynamics of the correlation parameter in the earthquake preparation area according to the BJI global catalog

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: anna@omzg.sscc.ru

Abstract. According to the BJI global earthquake catalog, the dynamics of the environment on the eve of the strongest ($M_S \geq 8$) and moderate ($M_S \geq 4$) earthquakes has been studied using the K_{COR}^0 (the coefficient of paired correlation of the classical creepex Cr_0 and magnitude M_S) anomaly detection algorithm. A pattern of long-term anomalies preliminary the strongest earthquakes has been established within the boundaries of the far-reaching zone of influence of the preparation of the focus, the radius R_F of which is calculated taking into account the stress distribution in elastoplastic media. In the R_F -vicinity, the scanning algorithm of the entire catalog revealed a pattern (in 100% of cases) of significantly longer positive K_{COR}^0 anomalies (from one and a half months to 26 years) before the strongest earthquakes in the case of using the classic creepex $Cr_0 = M_S - m_b$ in comparison with the method using a normalized creepex (from 25 days to 3 years). This may indicate the establishment of a special elastic-plastic state of the environment in the R_F area, which is the preparation area for large earthquakes.

Keywords: catalogs and databases of earthquakes, parameters of seismic geodynamic process

Введение

Известно, что классический параметр крипекс $Cr_0 = M_s - m_b$ [1], рассчитываемый по соотношению поверхностной M_s и объемной m_b магнитуд, содержит информацию о состоянии геофизической среды, и, возможно, не только в очаге землетрясения, но и в зоне удаленного влияния (до расстояния R_d) на подготовку очага. С другой стороны, известно, что независимо от выбранного каталога, статистическое распределение всех землетрясений в координатах Cr_0 и M_s показывает линейный тренд, т.е. взаимную зависимость этих параметров. Это заставляло многих исследователей использовать различные виды нормирования параметра крипекс [2–4] с целью устранения его зависимости от магнитуды. В настоящей работе сделана попытка выяснить по данным глобального китайского каталога ВЛ, не является ли эта статистически выраженная зависимость свойством отдельных подмножеств каталога землетрясений (аналогично результатам, полученным по данным австрийского каталога IDC), и не связаны ли эти последовательности с физически обоснованной перестройкой среды.

Методы и материалы

Мы предполагаем, что радиус «ближней зоны» очага (по терминологии свода правил СП-2016 [5]):

$$R_B = 10^{M_s * 0.33 - 0.61} \quad (1)$$

соответствует области влияния полей напряжения в поликристаллическом упругом материале и может быть принят за границу жесткого включения очага. За пределами этой границы, по-видимому, более активен процесс передачи гидростатического давления в вязкоупругой среде (распорное действие пластичного вещества, заполняющего уже существующие разломы кристаллической среды), при котором изменение локального кристаллического давления может распространяться на сотни-тысячи километров.

Таким образом, оценку предельного размера R_d «дальней зоны» влияния очага можно получить на основе решения задачи о распределении напряжений в окрестности жесткого включения (будущего очага) в среде, находящейся в упругопластическом состоянии [6]. Сравнение скорости стремления напряжений к начальным значениям по мере удаления от включения в упругой и в упругопластической средах, согласно [6], дает оценки, пропорциональные $1/R^2$ и $1/R^D$, соответственно. При этом, оценки показателя D соответствует максимальной величине $D=1^{2/5}$ [6] (перекрывающей оценки для всех возможных внешних обстановок рассматриваемого жесткого включения очага). Таким образом, минимальная величина R_d соотносится с R_B как:

$$R_d = R_B^{2/D} = R_B^{2/1.4} \quad (2)$$

В радиусе R_d в настоящей работе исследуется поведение параметра $K_{кор}^0$ (коэффициента парной корреляции классического крипекса и магнитуды) по

сейсмичности, предвещающей все сильнейшие и умеренные землетрясения. Отметим, что ранее [7] по данным каталога IDC [8] (International Data Centre, Vienna International Centre, Austria) было установлено, что увеличение радиусов R_d в 1.8 раз уменьшает длительность аномалий $K_{\text{КОР}}^0$ в 2 и более раз, что говорит об оптимальности выбранного метода расчета R_d (2).

Используемый при расчете коэффициента корреляции параметр крипекс применялся нами ранее в ряде сейсмо-геодинамических исследований [9–10] в различных модификациях. Например, в результате применения нормированного крипекса Cr_0^{cat} [9] (представляющего собой величину отклонения классического крипекса $Cr_0 = M_s - m_b$ от тренда зависимости $Cr_0(M_s)$ по выбранному каталогу) было установлено, что в преддверие отдельных сильнейших землетрясений по сопровождающей их умеренной среднеглубинной сейсмичности в некоторой локальной области характерно установление высокой временной корреляции $K_{\text{КОР}}(t)$ (т.е. синхронная или, наоборот, противофазная динамика параметров Cr_0^{cat} и M_s). Начинается эта корреляция (величиной $|K_{\text{КОР}}| \geq 0.7$) за десятки дней до главного события и продолжается десятки и сотни дней после него. Однако, не все крупные землетрясения предвещаются такой аномалией. Например, по данным глобального каталога IDC [8] лишь 7 из 11 сильнейших ($M_s \geq 8$) землетрясений предвещаются в их R_d областях аномалиями $|K_{\text{КОР}}| \geq 0.7$ по сейсмичности с $H \geq 50$ км. А по данным глобального каталога ВЛ [11] (Института Геофизики Китайской Академии Наук) лишь половина (11 из 22) сильнейших землетрясений сопровождаются такими аномалиями.

В качестве более надежного и универсального показателя перестройки среды накануне сильнейших землетрясений предлагается рассмотреть параметр $K_{\text{КОР}}^0$, использующий ненормированный классический крипекс Cr_0 , который был предложен изначально [1] как параметр, отражающий физику поглощения геофизической средой очагового излучения, «соотношение между медленным и быстрым движением в очаге» [1] и т.д. При этом, его рост, синхронный с ростом магнитуды землетрясений определяется растущей с размерами очага [1] реологической неоднородности среды в очаге. В данной работе применяются различные условия расчета аномалий $K_{\text{КОР}}^0$: только для сильнейших землетрясений каталога или для всей умеренной сейсмичности; по всем событиям каталога до текущего события или только в его R_d области; по среднеглубинной предвещающей сейсмичности ($H \geq 50$ км) или по сейсмичности всего диапазона глубин.

Используемый в данной работе каталог ВЛ [11] содержит 65445 записей с парными определениями M_s и m_b за 01.06.1990–31.05.2025, из них – 35415 умеренных землетрясений (с $M_s \geq 4.6$) и 22 катастрофических (с $M_s \geq 8$).

Исследование проводится с помощью геоинформационной системы GIS-ENDDB [12] на основе следующих алгоритмов: 1) расчет R_d текущего события по формулам (1) и (2) и выбор предвещающей сейсмичности в соответствующей круговой области; 2) расчет для полученной выборки временных графиков параметра $K_{\text{КОР}}^0$ согласно алгоритму «с фиксированным в точке рассматриваемого события краем окна» [10]; 3) модифицированный метод Прозорова [12, 13] для

удаления роев из выборки землетрясений; 4) расчет и визуализация сферических диаграмм механизмов по данным гарвардского каталога GCMT [14].

Результаты

Сканирование глобального каталога ВЛ в R_d -окрестностях его катастрофических землетрясений с $M_S \geq 8$ выявляет предваряющие их положительные аномалии $K_{\text{КОР}}^0$ (величиной $|K_{\text{КОР}}^0| \geq 0.7$) абсолютно для всех 22 событий. Их длительность значительно более протяженные во времени (от полутора месяцев до 26 лет) по сравнению с $K_{\text{КОР}}$, рассчитанному по нормированному крипексу (от 25 дней до 3 лет). При этом, для среднеглубинной сейсмичности ($H \geq 50$ км) 5 из 22 крупнейших событий не сопровождаются предваряющими аномалиями $K_{\text{КОР}}^0$ (отмечены белыми окружностями на рис. 1), являясь либо сдвигами, либо достаточно удаленными от межплитных границ событиями (рис. 1). В табл. 1 эти события отмечены синим фоном.



Рис. 1. Распределение сильнейших событий ($M_S \geq 8$) каталога ВЛ. Пять землетрясений, не имеющих предваряющих аномалий $K_{\text{КОР}}^0$ по среднеглубинной сейсмичности показаны в виде стереограмм механизмов (по данным каталога GCMT [14]).

Интересно, что глубинные аномалии для 5 событий начинаются раньше, чем аномалии $K_{\text{КОР}}^0$ по всему диапазону глубин (табл. 1). Для Суматринских 26.12.2004 и 28.03.2005 – на 12 и 14 лет раньше, Симуширских 15.11.2006 и 13.01.2007 – на 2 года и 5 лет раньше, для Тохоку 11.03.2011 – на 6 месяцев, для аляскинского 29.07.2021 – на 7 лет раньше. Это может свидетельствовать о большем влиянии на эти события глубинных процессов подготовки, например, связанных с активным привносом глубинного вещества.

Как отмечалось выше, аномалии $K_{\text{КОР}}$, рассчитанные по нормированному крипексу и сейсмичности $H \geq 50$ км, предваряют лишь 11 из 22 землетрясений

(события без аномалий $K_{\text{кор}}^0$ отмечены в табл. 1 голубой заливкой первой ячейки), а по событиям всего диапазона глубин – лишь 10 сильнейших землетрясений (красный цвет на рис. 2, одна аномалия отрицательна). События без аномалий отмечены сиреневым квадратом в табл.1.

Таблица 1. Основные параметры сильнейших землетрясений каталога ВЛ и длительность аномалий $K_{\text{кор}}^0$ в днях (для всего диапазона глубин и для глубин $H \geq 50$ км).

	Year	Mo	Da	Hr	Mn	Sec	Latitude	Longitude	Dep	creep	Ms	Kcor ⁰	Kcor ⁰ _{dep}
■	1992	6	28	11	57	38,1	34,144	-116,609	10	2,0	8,0	624	
■	1999	8	17	0	1	40,6	40,797	29,995	16	1,9	8,0	3387	
■	2000	6	18	14	44	15,1	-13,917	97,501	14	1,4	8,0	2992	
■	2002	11	3	22	12	42,8	63,516	-147,573	11	1,4	8,1	4609	4547
	2003	9	25	19	50	8,0	41,918	143,920	26	1,5	8,2	163	503
	2004	12	23	14	59	2,1	-49,784	161,392	4	1,9	8,0	4780	
	2004	12	26	0	58	53,0	3,315	95,983	26	2,1	8,9	798	5394
■	2005	3	28	16	9	36,7	2,100	97,096	27	2,4	8,6	47	5489
	2006	4	20	23	25	2,4	60,880	167,046	23	2,0	8,3	5909	5337
■	2006	11	15	11	14	14,4	46,574	153,354	16	1,7	8,0	808	1501
■	2007	1	13	4	23	22,6	46,128	154,420	16	1,2	8,1	50	1845
■	2007	9	12	11	10	26,7	-4,443	101,468	24	2,5	8,6	6403	6403
■	2007	9	12	23	49	4,2	-2,623	100,773	39	1,8	8,2	6404	6320
■	2008	5	12	6	28	0,5	30,993	103,391	10	1,8	8,2	6597	
■	2011	3	11	5	46	23,2	38,296	142,498	19	1,4	8,7	80	285
	2012	4	11	8	38	37,8	2,237	93,014	26	2,0	8,6	8107	1052
■	2012	4	11	10	43	10,5	0,767	92,428	21	1,3	8,2	8107	2317
	2015	4	25	6	11	26,6	28,130	84,717	13	2,0	8,2	9261	8516
	2016	11	13	11	2	59,7	-42,665	172,923	16	1,9	8,0	9595	4939
■	2016	12	8	17	38	46,8	-10,790	161,280	47	1,6	8,1	9862	1309
■	2018	1	23	9	31	40,9	55,931	-149,188	9	1,3	8,2	2564	2530
■	2021	7	29	6	15	47,4	55,445	-157,997	22	1,2	8,1	1280	4020

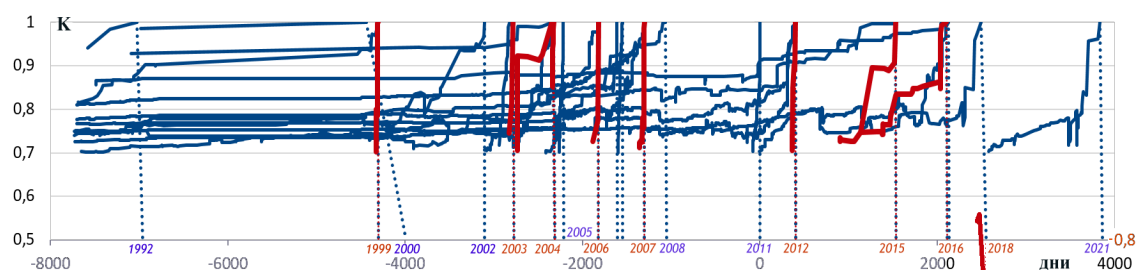


Рис. 2. Аномалии $|K_{\text{кор}}^0| \geq 0.7$ (синий цвет) и $|K_{\text{кор}}| \geq 0.7$ (красный) перед катастрофическими землетрясениями $M_S \geq 8$ каталога ВЛ в дальней области R_D влияния их будущих очагов. На оси времени отмечены моменты событий.

Аномалии $K_{\text{кор}}^0$ перед событиями $M_S \geq 8$ всегда положительны, не зависимо от типа очагов и их геодинамического окружения. Общее количество землетрясений, входящих в их цепочки высокой корреляции составляет 19% от общего количества событий каталога. Однако, не только перед сильнейшими событиями каталога присутствуют подобные высоко-корреляционные цепочки землетрясений. Они выявляются также накануне 10994 событий меньшей магнитуды ($4.6 \leq M_S < 8$) в их R_D -областях (при этом, лишь 289 из них – отрицательные: $K_{\text{кор}}^0 \leq -0.7$). Все они имеют длительность от 20 дней до 24 лет (≥ 4 событий в цепочке),

многие цепочки перекрываются (т.е. один ряд событий может входить в десятки цепочек), но общее количество событий в них охватывает 84% всех событий каталога. Лишь 2% из этих цепочек (269) включают сильнейшие $M_s \geq 8$ события, т.е. связаны с их подготовкой или релаксацией. Это говорит о том, что процессы, проявляемые роями в преддверии 31% умеренных $M_s \geq 4.6$ землетрясений каталога в их относительно небольших R_d -областях (охватывающих, в том числе, и более сильные землетрясения), аналогичны процессам подготовки сильнейших событий. Отметим, что по среднеглубинной сейсмичности в R_d -областях всех событий с $M_s \geq 4.6$ их предваряющих цепочек с $|K_{\text{КОР}}| \geq 0.7$ вчетверо меньше.

Корреляция параметров событий хронологических цепочек R_d -областей может свидетельствовать, например, об особом напряженно-деформированном состоянии среды в этих областях, иногда очень длительном. Возможно, что часть этих цепочек составляют сейсмические рои, общий генезис которых может отражаться в аномалиях $K_{\text{КОР}}^0$. Чтобы оценить влияние роев на приведенную выше статистику, проведем сканирование каталога, очищенного от роев. Это влияние оказывается незначительным – общее количество событий $M_s \geq 4.6$ после этой операции уменьшается в 2.1 раз (16937 событий), а количество цепочек в их R_d -областях – в 2.8 раз (3947 цепочек).

Для сравнения проверим наличие корреляции в хронологических цепочках каталога без ограничений по расстоянию. Сканирование каталога выявляет 2962 таких цепочек (8% от общего числа событий каталога) длительностью от 20 дней до 2.25 лет. Причем аномалии $K_{\text{КОР}}^0$ только для двух цепочек отрицательны с длительностью менее 1.5 месяцев (характеризуют возможную кратковременную консолидацию среды), остальные положительны. Цепочки охватывают 28885 событий, т.е. ~82% событий каталога группируются в эти относительно краткие по времени и разбросанные территориально последовательности, характеризующиеся корреляцией, не зависимо от зон подготовки конкретных землетрясений (при этом, 85% событий этих цепочек входят также в цепочки R_d -кругов подготовки землетрясений $M_s \geq 4.6$). Наличие этих цепочек может быть обусловлено внешними (региональными или планетарными) процессами растяжения/сжатия, вызывающими триггерную нелокализованную сейсмичность, в свою очередь, провоцирующую дальнейшую сейсмическую активность областей с особым состоянием среды. Интересно, что при рассмотрении среднеглубинной сейсмичности (ограниченной глубиной $H \geq 50$ км), предваряющей все землетрясения $M_s \geq 4.6$, выявляется вдвое больше корреляционных цепочек: 5999 (из них 72 отрицательных), хотя общее количество событий $H \geq 50$ км составляют лишь 11% каталога (82% из которых входят в цепочки корреляции). Из них 1122 событий имеют цепочки как по всему диапазону глубин (38% из 2962 цепочек), так и по среднеглубинной сейсмичности (рис. 3). Эти цифры могут говорить о том, что глубинные процессы во много раз более активно реагируют на внешние причины глобальных изменений растяжения/сжатия, создавая условия активизации коровой сейсмичности для 17% событий каталога.

Положительный знак аномалий $K_{\text{КОР}}^0$ и их многолетняя длительность в R_d -областях подготовки всех сильнейших и 30% умеренных землетрясений (в ближней и дальней зоне их очагов) можно объяснить пластическими процессами, например,

гидростатическим давлением вязкоупругой среды при заполнении существующих разломов дополнительным материалом. Источником привноса пластичного вещества могут быть глубинные области частичного плавления пород [15–16]. Ростом плотностной неоднородности среды объясняется пропорциональная зависимость крипекса от величины очага [1] (т.е. их высокая корреляция) в областях подготовки землетрясений.

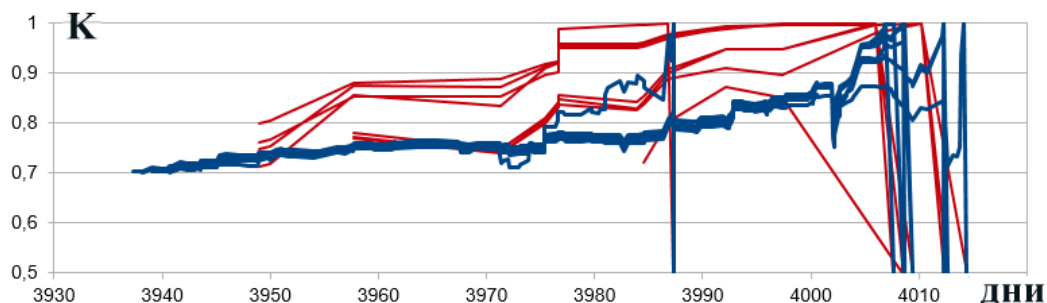


Рис. 3. Аномалии $K_{\text{КОР}}^0 \geq 0.7$ перед землетрясениями $M_s \geq 4.6$ октября-декабря 2021г каталога ВЛ по всей сейсмичности каталога (синий цвет) и по сейсмичности $H \geq 50$ км (красный).

Заключение

Сканирование параметров сейсмических событий глобального ВЛ-каталога показывает закономерность наличия длительных от 0.4 до 26 лет аномалий $K_{\text{КОР}}^0$ (коэффициента парной корреляции классического крипекса и магнитуды землетрясения) с $|K_{\text{КОР}}^0| \geq 0.7$ в области R_d влияния подготовки будущего очага всех сильнейших и трети умеренных землетрясений каталога. Преимущество использования параметра $K_{\text{КОР}}^0$ (основанного на классическом крипексе $Cr_0 = M_s - m_b$ по сравнению с нормированной модификацией крипекса $K_{\text{КОР}}$, в наличии его аномалий для 100% случаев катастрофических событий $M_s \geq 8$ мирового каталога ВЛ. При этом, аномальные по $K_{\text{КОР}}^0$ цепочки событий в R_d -областях умеренных ($M_s \geq 4.6$) землетрясений ВЛ не уступают им по длительности (до 24 лет), а по охвату событий в цепочках имеют массовый характер (84% всех событий каталога), подтверждая, что свойство линейной зависимости классического крипекса от магнитуды, статистически проявляемое по всему каталогу, сконцентрировано в локальных цепочках сейсмичности, предвещающих некоторые события в их областях подготовки. Положительный знак и массовость описанных аномалий могут свидетельствовать о пластических процессах подготовки будущего очага, весьма длительных (многолетних) по времени и масштабных (от десятков до пары тысяч км) по расстоянию. Выполнено в рамках госзадания № FWNM–2025–0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прозоров А. Г., Хадсон Д. Зависимость между MLH и mPV от региональных условий и локальных взаимосвязей // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. – Т. 2. – М. ИФЗ АН СССР, 1974. – С. 208–216.

2. Прозоров А. Г., Хадсон Д. А. Изменение крипекса перед сильными землетрясениями // Вычислительная сейсмология. – М.: Наука, 1983. – Вып. 45. – С. 26–35.
3. Неверова Н.П. (2009). Крипекс – характеристика очага землетрясения // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Мат. IV Межд. сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН. – С. 127–129.
4. Михеева А. В., Калинин И. И. Крипекс-анализ процессов в очаговых зонах крупных землетрясений средствами GIS-ENDDB // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 4. – С. 7–17.
5. Свод правил СП 283.1325800.2016 "Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования" (утв. приказом Мин-ва строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 16.12.2016 г. N 981/пр).
6. Лермонтова А. С., Ребецкий Ю. Л. О проблеме дальнего действия аномалии напряженного состояния включения/разрыва в среде, находящейся в закритическом состоянии // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. – М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2016. – Т. 1. – С. 470–474.
7. Mikheeva A. V. The magnitude and creepex correlation parameter as an indicator of the environmental restructuring in preparation for the strongest earthquakes // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Math. Model. in Geophys. – 2025. – V. 27. – P. 13–22.
8. International Data Centre, CTBTO (IDC) // In: On-line Bulletin [Site]. – United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre. – URL: <https://www.isc.ac.uk/cgi-bin/agency-get?agency=IDC> (the application date 20.03.2026).
9. Михеева А. В. Динамика параметров среднеглубинной сейсмичности перед крупными землетрясениями южно-азиатских сейсмофокальных зон // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 51–60.
10. Михеева А. В., Калинин И. И. О влиянии предполагаемого глобального глубинного разлома на сильные землетрясения Индонезии // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 4. – С. 52–64.
11. Catalog of China Bureau of Earthquake Research BJI of Institute of Geophysics, Academy of Sciences of China. URL: www.isc.ac.uk/cgi-bin/collect?Reporter=BJI (the application date 20.03.2026).
12. Михеева А. В. Геоструктурные элементы, выявляемые математическими алгоритмами и цифровыми моделями геоинформационно-вычислительной системы GIS-ENDDB. – Новосибирск: Омега Принт, 2016. – 300 с.
13. Прозоров А. Г. Динамический алгоритм выделения афтершоков для мирового каталога землетрясений // Вычислительная сейсмология. – 1986. – Вып. 19 : Математические методы в сейсмологии и геодинамике. – С. 58–62.
14. Global CMT Catalog. [Электронный ресурс]. – Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA. – 2025. – URL: <http://www.globalcmt.org>.
15. Волярович М. П., Томашевская И. С., Будников В. А. Механика горных пород при высоких давлениях. – М.: Наука, 1979. – 151 с.
16. Калинин А. С., Шарапов В. Н., Васильева Э. Н. О динамике конвективного плавления пород коры в зонах глубинных разломов // Геология и геофизика. – 1976. – Т. 2. – С. 54–59.

© А. В. Михеева, 2026

А. М. Осипова¹✉, А. А. Якименко^{1,2}

Платформа для экспериментов по локализации акустического источника с учётом факторов окружающей среды

¹Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: rowleynau@mail.ru

Аннотация. В статье представлена разработанная платформа, предназначенная для проведения экспериментов по локализации акустических источников с учётом влияния факторов окружающей среды. Актуальность данной работы связана с отсутствием доступных программных инструментов, которые позволяют проводить математическое моделирование методом разности времён прихода сигнала (TDOA) с автоматическим учётом метеорологических условий. Цель исследования заключается в создании клиент-серверного приложения, позволяющего решать прямую и обратную задачи акустической локализации в веб-браузере, без необходимости установки дополнительного программного обеспечения. При реализации платформы были использованы Python с микрофреймворк Flask для серверной части, реляционная база данных PostgreSQL и для интерактивной визуализации API Яндекс.Карт. При локализации учитывается влияние погодных условий, включая температуры, влажности, а также скорости и направления ветра на эффективную скорость распространения звука, а также реализован учёт типа подстилающей поверхности посредством интеграции данных с внешних сервисов (Open-Meteo, Open-Elevation, Overpass). Платформа предоставляет пользователям возможность создавать, сохранять в базе данных и взаимодействовать с собственными проектами, а также организовать автоматизированные серийные эксперименты с изменением выбранных параметров и последующим экспортом результатов в формате CSV. Представленная разработка может быть полезна для научных и образовательных учреждений, занимающихся исследованием точности методов акустической локализации в условиях изменяющихся метеословий.

Ключевые слова: акустическая локализация, TDOA, веб-платформа, влияние факторов окружающей среды

А. М. Osipova¹✉, А. А. Yakimenko^{1,2}

A platform for experiments on acoustic source localisation, taking environmental factors into account

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: rowleynau@mail.ru

Abstract. This article presents a newly developed platform designed for conducting experiments on the localisation of acoustic sources, taking into account the influence of environmental factors. The relevance of this work stems from the lack of available software tools that enable mathematical modelling using the time difference of arrival (TDOA) method with automatic consideration of meteorological conditions.

The aim of the research is to create a client-server application that enables the direct and inverse problems of acoustic localisation to be solved in a web browser, without the need to install additional software. The platform was implemented using Python with the Flask microframework for the server-side, a PostgreSQL relational database, and the Yandex.Maps API for interactive visualisation. The localisation process takes into account the influence of weather conditions, including temperature, humidity, and wind speed and direction, on the effective speed of sound propagation; it also accounts for the type of underlying surface through the integration of data from external services (Open-Meteo, Open-Elevation, Overpass). The platform enables users to create, save to a database and interact with their own projects, as well as to organise automated batch experiments involving changes to selected parameters and the subsequent export of results in CSV format. This development may be useful for scientific and educational institutions engaged in researching the accuracy of acoustic localisation methods under changing weather conditions.

Keywords: acoustic localisation, TDOA, web platform, influence of environmental factors

Введение

Задача определения положения источника звукового сигнала методом разности времён прихода сигнала (TDOA) широко применяется в различных областях, включая мониторинг городского шума и поисково-спасательные операции [1–3]. Точность локализации по TDOA существенно зависит от внешних факторов, таких как температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра, а также типа подстилающей поверхности [4, 5]. Поскольку скорость звука варьируется в зависимости от этих условий, использование фиксированного значения может приводить к систематическим ошибкам при определении координат источника.

В данной работе поставлена задача разработки веб-платформы для проведения экспериментов по локализации акустического источника с учётом влияния факторов окружающей среды.

Методы и материалы

Для локализации акустического источника выбран метод TDOA (Time Difference of Arrival) [4], основанный на измерении разницы времени прихода акустического сигнала к приемникам. Временная задержка между двумя приемниками выражается как:

$$\Delta t_{i(j)} = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}{c_i} - \frac{\sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}}{c_j}, \quad (1)$$

где $\Delta t_{i(j)}$ – временная задержка между i -м и j -м приемниками; (x, y) – координаты источника звука; (x_i, y_i) , (x_j, y_j) – координаты i -го и j -го микрофонов C_i , C_j – скорость звука для соответствующих микрофонов.

Скорость распространения звука сильно зависит от погодных условий. В исследованиях отмечаются такие параметры, как температура, влажность и ветер [5].

Формула Лапласа [6] используется для расчёта скорости звука в воздухе с учётом температуры и влажности:

$$C = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}, \quad (2)$$

где C – скорость звука, γ – коэффициент адиабаты (для воздуха $\approx 1,4$), R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура в Кельвинах, M – молярная масса воздуха. При увеличении содержания водяного пара эффективная молярная масса смеси уменьшается, что изменяет скорость звука.

Влияние ветра учитывается поправкой на направление и скорость воздушного потока относительно направления звуковой волны [7]. Эффективная скорость звука при ветре определяется формулой:

$$C_{\text{вект}} = C + v_{\text{ветра}} \cdot \cos(\theta_{\text{ветра}} - \theta_{\text{звука}}), \quad (3)$$

где $C_{\text{вект}}$ – эффективная скорость распространения звука в заданном направлении, C – скорость звука в неподвижном воздухе (рассчитанная по формуле Лапласа), $v_{\text{ветра}}$ – скорость ветра, $\theta_{\text{ветра}}$ – направление ветра, $\theta_{\text{звука}}$ – направление распространения звука.

При распространении акустической волны на открытой местности на сигнал влияет тип подстилающей поверхности. Для учёта этого эффекта применяется модель эквивалентного поверхностного импеданса, предложенная в работе по распространению звука над водной поверхностью [8]. В разработанном алгоритме модель применяется разных типов подстилающей поверхности. Отражение звуковой волны от поверхности описывается коэффициентом отражения:

$$R = \frac{Z_s - \rho c}{Z_s + \rho c}, \quad (4)$$

где Z_s – эффективный акустический импеданс поверхности, ρ – плотность воздуха, C – скорость звука.

Платформа реализована с использованием клиент-серверной архитектуры. Серверная часть написана на Python и обеспечивает обработку HTTP-запросов, взаимодействие с базой данных PostgreSQL и выполнение математических расчётов. Клиентская часть реализована в формате одностраничного веб-приложения и включает в себя карту на базе API Яндекс. Обмен данными происходит с помощью REST API в формате JSON. Для защиты API-запросов применяется аутентификация по Bearer-токену. Сервер также взаимодействует с внешними API: Open-Meteo, Open-Elevation и Overpass.

Ознакомиться с моделью базы данные можно на рисунке 1. Она содержит следующие основные таблицы: users с полями идентификатор, email, даты регистрации и входа, таблицу datasets с идентификатором, названием, даты создания и изменения, внешним ключом на пользователя, таблицу registrators с идентификатором, названием, координатами, временем прихода сигнала, погрешностью, метеопараметрами и внешним ключом на проект, таблицу sources с идентификатором, названием, координатами, внешним ключом на проект.

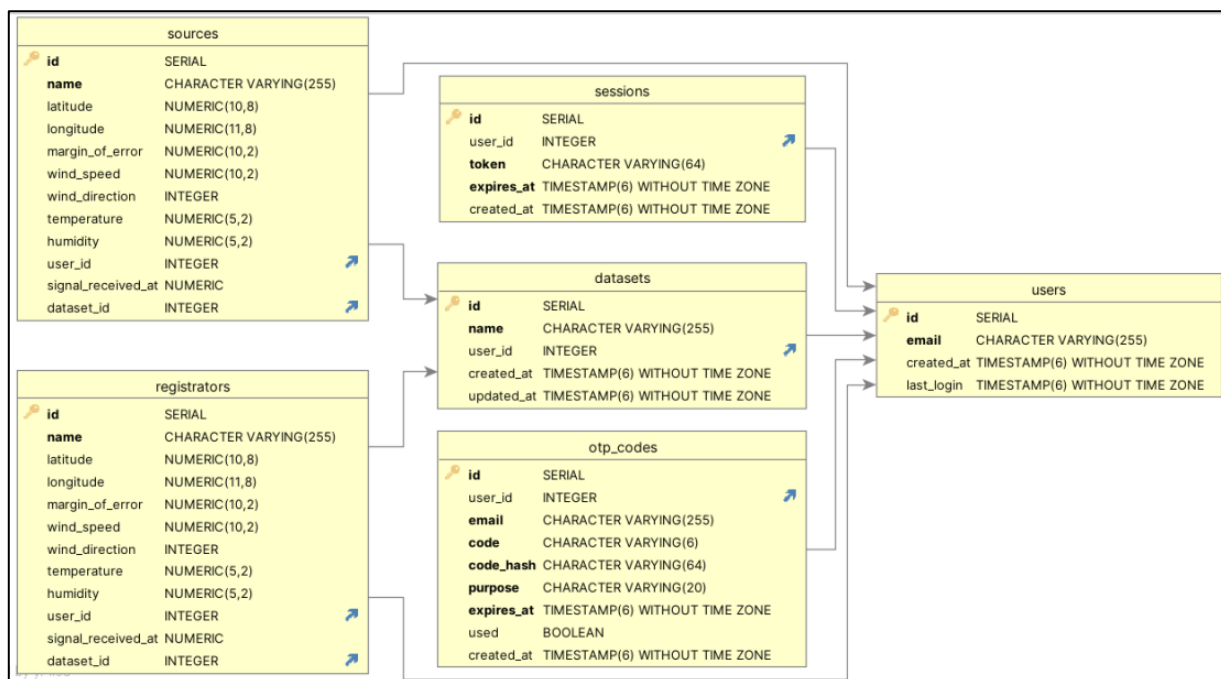


Рис. 1. Физическая модель базы данных

Пользовательский интерфейс включает в себя страницу аутентификации и основную. Страница аутентификации содержит поле ввода адреса электронной почты и кнопку «Получить код». После отправки кода на экране появляется поле для ввода шестизначного ОТП-кода с обратным отсчётом истечения периода действия кода. При успешной верификации выполняется переход на рабочую область.

Основная страница (рис. 3) содержит интерактивную карту, меню и боковой панели управления. При вызове контекстного меню карты, можно добавить на карту регистратор или источник.

В верхней части расположено меню с разделами «файл», включающее свойства, сохранение, загрузку и создание проектов, «панель» с управлением отображения легенды и учёта погодных условий, «эксперименты», а также кнопки для решения обратной и прямой задач и выхода из аккаунта.

Модальное окно свойств проекта содержит три вкладки: «Главная» с названием проекта, датой создания и последнего изменения, «Элементы» со списком регистраторов и источников текущего проекта с возможностью удаления и «Добавить» с выбором регистраторов и источников из других проектов пользователя для повторного использования.

Модальное окно «мои проекты» содержит список проектов пользователя с поиском по названию, информацией о датах и количестве элементов, а также кнопками открытия и удаления проекта.

В правой панели находится дата фиксации времени прихода сигнала. Также, как было описано ранее, в нем могут быть отображены легенда и режимы влияния погодных условий. Настройки учета влияния позволяют настраивать не

только сам факт учета, но и определить способ получения значений либо из сторонних арі, либо задание вручную.

У регистраторов, размещенных на карте, есть контекстное меню, позволяющее удалить элемент или открыть параметры (рис. 2). Окно параметров содержит название, координаты, время получения сигнала, погрешность измерения, а также температура, скорость и направление ветра, влажность, если включен их учет при локализации. Изменения применяются при нажатии на кнопку «Изменить».

Рис. 2. Окно параметров регистратора

Панель результатов расположена в нижней части экрана. После проведения вычислений в ней появляются значения учитываемых погодных условий, скоростью распространения звукового сигнала и координаты регистраторов и источника. При серийном эксперименте результат дополняется графиком.

Результаты

Рассмотрим сценарий использования платформы от аутентификации до проведения эксперимента.

На первом этапе осуществляется аутентификация: пользователь переходит на стартовую страницу, вводит адрес электронной почты и получает шестизначный ОТР-код. Этот код вводится в соответствующее поле, после чего система проверяет его правильность и инициирует сессию. При первом входе автоматически создаётся учётная запись пользователя.

На втором этапе происходит создание проекта и размещение элементов. После авторизации на экране отображается основная страница с интерактивной картой. При помощи контекстного меню (клик правой кнопкой мыши) пользователь добавляет регистраторы, которые визуализируются на карте. Расположим 3 регистратора с погрешностью 20% по координатам широта 54°54'21,90" долгота 82°38'58,83", широта 54°57'12,72" долгота 82°47'57,71" и широта 54°51'2,36"

долгота 82°50'35,91" временами получения сигнала 19.71715848 21.65986442 23.48788087 соответственно и погрешностью измерения 20% у каждого.

Третий этап связан с настройкой среды. В боковой панели пользователь управляет учетом определенных факторов среды. Метеорологические параметры могут задаваться как вручную через параметры регистратора, так и подгружаться автоматически с использованием API по дате проведения эксперимента. Выберем учет температуры, влажности, скорости и направления ветра с автоматической подгрузкой.

Четвёртый этап предусматривает выполнение расчёта. При нажатии на кнопку «Рассчитать» координаты регистраторов и параметры учета среды передаются на сервер, где решается задача TDOA с учетом заданных условий. Результаты отображаются на карте в виде источника звукового сигнала, области погрешности и направления ветра, а также в нижней панели: координаты источника, площадь области погрешности и таблица с параметрами регистраторов, вводных и рассчитанных, как показано на рисунке 3.

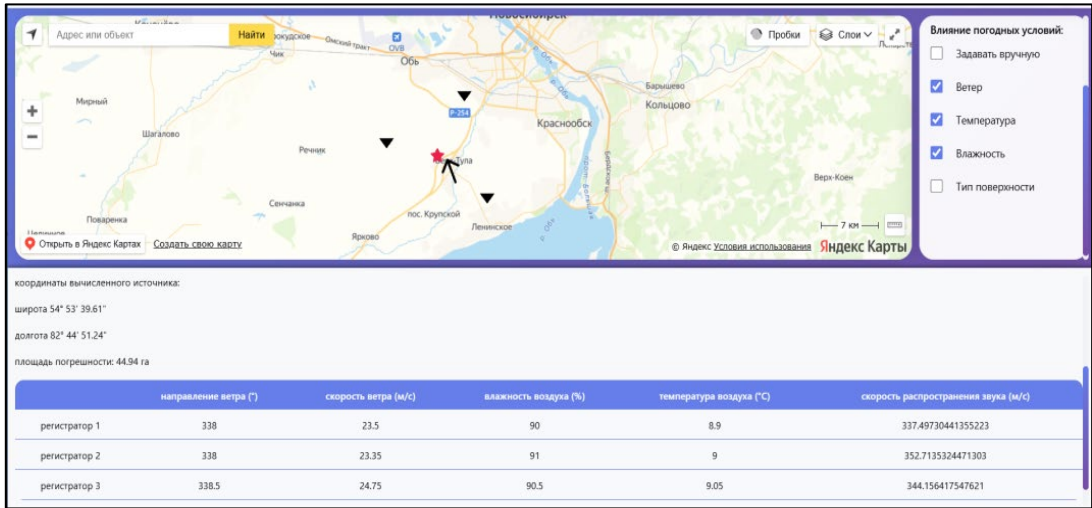


Рис. 3. Результаты локализации источника звукового сигнала с учетом температуры, влажности, скорости и направления ветра и автоматической подгрузкой

На пятом этапе проведем серийные эксперимент с температурой окружающей среды. Для исследования пользователю необходимо открыть окно настройки соответствующего эксперимента, задать диапазон и количество шагов. Определим диапазон от -30 до 30 с шагов 10. Платформа автоматически выполняет серию расчётов, формирует сводную таблицу и строит график зависимости площади неопределённости от температуры (рис. 4). Результаты можно экспортировать в формате CSV и png.

Результаты экспериментов с температурой					
№ эксп.	Температура (°C)	Широта источника	Долгота источника	Скорость звука (м/с)	Площадь погрешности
1	-30.00	54° 53' 43.61"	82° 45' 2.27"	312.56	38.12 га
2	-23.33	54° 53' 43.45"	82° 45' 2.00"	316.81	34.18 га
3	-16.67	54° 53' 44.26"	82° 45' 1.41"	321.01	41.05 га
4	-10.00	54° 53' 43.72"	82° 45' 1.35"	325.16	41.68 га
5	-3.33	54° 53' 44.11"	82° 45' 0.97"	329.25	39.02 га

Рис. 4. Фрагмент результатов проведения эксперимента с температурой

Обсуждение

Сквозной сценарий демонстрирует полный цикл работы с платформой. При решении обратной задачи с тремя регистраторами и автоматической подгрузкой метеоданных вычисленный источник локализован в точке 54°53'39,61" с.ш., 82°44'51,24" в.д. с площадью неопределённости 44,94 га. Эффективные скорости звука для регистраторов различаются вследствие пространственной вариации метеопараметров и влияния ветра, что подтверждает целесообразность индивидуального расчёта скорости для каждой трассы. Серийный эксперимент с варьированием температуры от –30°C до +30°C показал высокую стабильность координатной оценки: разброс по широте не превысил 1,3", 40 м., по долготе отмечено монотонное смещение на 3,8", 45 м., связанное с систематическим влиянием ветра.

Заключение

Разработана веб-платформа для проведения экспериментов по локализации акустического источника с учётом факторов окружающей среды. В платформу интегрирована возможность автоматического получения метеорологических данных, реализованы режимы решения прямой и обратной задач локализации, а также проведение серийных экспериментов.

В рамках эксперимента с использованием трёх регистраторов подтверждена функциональность платформы: локализованный источник определён с площадью области неопределённости, при этом эффективные скорости звука, рассчитанные для каждого регистратора, проявили вариативность в зависимости от локальных метеоусловий. Серийное испытание, в ходе которого температура изменялась в диапазоне от –30°C до +30°C, продемонстрировало устойчивость координатной оценки.

Таким образом, разработанная платформа предоставляет исследователям инструмент для оперативного выявления влияния окружающей среды на точность локализации, что подчёркивает её потенциал в применении при научных исследованиях и образовательной деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Davis D. Mobile sensing for the localization and tracking of acoustic sources in urban environments / D. Davis, W. Mahmoud, M. Denis // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2023. – Vol. 153. – № 3. – P. A44.
2. 석윤정 , KIM SUNG JAE , Park S.Y., Jin Ho Suh, A Study on the Survivor Detection Module and Least-Squares Sound Source Localization Algorithm for Victim Search in Narrow Spaces. – 2025. V. 20. No.1. – P. 120 – 129.
3. Seok Y.-J., Kim S.-J, Park S.-Y., Suh J.-H. A Study on the Survivor Detection Module and Least-Squares Sound Source Localization Algorithm for Victim Search in Narrow Spaces // Journal of Korea Robotics Society. –2025. - V. 20. - No. 1.- P. 120–129.
4. Шаход Д. М. Анализ подходов и методов локализации акустических источников // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2024. – Т. 17. – № 3. – С. 380–398.
5. Sai Charan Trikootam, Maarten Hornikx The wind effect on sound propagation over urban areas: Experimental approach with an uncontrolled sound source // Building and Environment. – 2019. – № 149. – С. 561-570.
6. Hornikx M., Dohmen M., Conen K. The wind effect on sound propagation over urban areas: Predictions for generic urban sections // Building and Environment. – 2018. – № 144. – С. 519–531.
7. Суторихин И. А., Литвиненко С. А. Климатические и природные факторы, влияющие на распространение акустических волн // Известия Алтайского государственного университета. – 2011. – Т. 69. – № 1-1. – С. 197–199.
8. Vecchiotti A., Ryan T., Vignola J., Turo D. Atmospheric sound propagation over rough sea: numerical evaluation of equivalent acoustic impedance of varying sea states // Acoustics. – 2024. – Vol. 6. – P. 489–508. – DOI: 10.3390/acoustics6020026.

© А. М. Осипова, А. А. Якименко, 2026

Ю. В. Перепечко¹✉, В. Н. Доровский¹

Разрушение насыщенной жидкостью горной породы

¹Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: yuri@perep.ru

Аннотация. Представлена нелокальная теория разрушения насыщенной пористой среды. Уравнения термодинамически согласованной модели деформации пористой среды, основанной на Максвелловском представлении о релаксационном характере неупругих деформаций, получены в рамках метода законов сохранения. В модели, помимо классических параметров, таких как тензоры напряжений и деформаций, вводится дополнительный параметр состояния, посредством которого учитывается нелокальность деформаций. Дополнительный параметр представляет собой тензор кривизны, выраженный через метрический тензор деформаций, и называется параметром разрушения. Изучены термодинамические свойства модели и сформулированы управляющие дифференциальные уравнения для пространственно-нелокальной модели, которые включают уравнение упругости и параболическое уравнение для параметра разрушения. Модель может быть применена к изучению проблемы разрушения горных пород. В качестве примера численно исследована одномерная задача о деформации конечного слоя, нагруженного нормальным поверхностным напряжением. Численный алгоритм основан на методе Рунге - Кутты третьего порядка по времени. Аппроксимация по пространству использует WENO реконструкцию для гиперболической части уравнений и конечно-разностную аппроксимацию для остальных производных. Показано формирование периодических зон деструкции насыщенных жидкостью пористых пород с характерным пространственным масштабом. Установлена зависимость характерного масштаба разрушения от пористости породы, а также от давления в поровой жидкости.

Ключевые слова: насыщенная пористая среда, пластические деформации, нелокальная теория упругости

Yu. V. Perepechko¹✉, V. N. Dorovsky¹

Destruction of rocks saturated with liquid

¹V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: yuri@perep.ru

Abstract. A nonlocal theory of destruction of a saturated porous medium is presented. The equations of a thermodynamically consistent model of porous medium deformation, based on the Maxwellian concept of the relaxation nature of inelastic deformations, are obtained within the framework of the method of conservation laws. In addition to classical parameters such as stress and strain tensors, the model introduces an additional state parameter that takes into account the nonlocality of deformations. This additional parameter is the curvature tensor expressed through the metric strain tensor and is called the destruction parameter. The thermodynamic properties of the model are studied, and governing differential equations for the spatially nonlocal model are formulated, which include the elasticity equation and a parabolic equation for the fracture parameter. The model can be applied to the study of rock fracture. As an example, a one-dimensional problem of the deformation of a finite layer loaded with normal surface stress is numerically investigated. The numerical algorithm is based

on the third-order Runge-Kutta method in time. The spatial approximation uses WENO reconstruction for the hyperbolic part of the equations and finite-difference approximation for the remaining derivatives. The formation of periodic destruction zones in fluid-saturated porous rocks with a characteristic spatial scale is demonstrated. The dependence of the characteristic destruction scale on the rock porosity and the pore fluid pressure is established.

Keywords: saturated porous medium, plastic deformations, nonlocal theory of elasticity

Введение

Термодинамически согласованная модель деформации сплошной среды, основанная на Максвелловском представлении о релаксационном характере неупругих деформаций, была сформулирована в [1] и использована при решении большого числа задач. Обобщение термодинамически согласованной модели для двухскоростных процессов течения сжимаемой жидкости в упругой пористой среде содержится в [2, 3]. В процессе неупругого деформирования пористой матрицы тензор кривизны, порожденный метрическим тензором деформаций, становится ненулевым, то есть среду нельзя перевести в ненапряженное состояние и неупругие деформации выводят поле деформаций напряженного состояния из Евклидова пространства. Развитию данного подхода способствовало открытие процессов зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок [4, 5]. В работе [6] было предложено рассматривать тензор кривизны в качестве параметра состояния среды и исследованы характерные особенности стационарного пространственного распределения деструкции. В результате этого предположения теория становится нелокальной, в уравнениях появляются производные более высокого порядка от метрического тензора деформаций. Как следствие, возникает пространственная периодическая структура, которая может трактоваться как развитие зональной дезинтеграции среды. Идеи неевклидовой модели сплошной среды [6] были развиты в работах [7, 8, 9] для описания деформации внутренней структуры горных пород. В работе [9] были рассмотрены нестационарные режимы дезинтеграции в однородной деформируемой среде и показано, что амплитуды параметра дезинтеграции в нестационарных режимах могут значительно превосходить амплитуды стационарных режимов. В настоящей работе общие идеи нелокальной теории упругости переносятся на пористые насыщенные среды.

Математическая модель

В прикладных задачах геофизики особый интерес представляет развитие основ теории дезинтеграции в применении к разрушению пористой среды. Представленная ниже математическая модель динамики неупругого деформирования насыщенной жидкостью пористой среды основывается на использовании фундаментальных физических принципов: законов сохранения, втором начале термодинамики для равновесных и неравновесных процессов, групповой инвариантности дифференциальных уравнений. В качестве локальных параметров состояния насыщенной пористой среды рассматриваются: парциальные плотности и скорости пористой матрицы (ρ_s , $\mathbf{u}$) и насыщающей жидкости (ρ_l , $\mathbf{v}$) соответственно; метрический тензор дефор-

маций g_{ik} [1–3] и кривизна $R = g^{ik} R_{ik}$, порожденная тензором Риччи. Кривизна отождествляется с параметром деструкции. Для случая малых деформаций кривизна приводится к виду $R = \partial_k \partial_k g_{ll} - \partial_i \partial_k g_{ik}$. Вместо метрического тензора деформаций g_{ik} ниже используется тензор деформаций $\varepsilon_{ij} = (\delta_{ij} - g_{ij})/2$, так что $R/2 = \partial_i \partial_k \varepsilon_{ik} - \Delta \varepsilon_{ll}$.

Локальная термодинамика двухскоростной среды определяется заданием функциональной зависимости внутренней энергии единицы массы $e_0(\rho, \varepsilon_{ik}, R, w)$. В случае малых деформаций внутренняя энергия принимает вид, включающий части, как связанные с процессами упругой e_e и пластической e_d деформацией, так и с относительным движением фаз

$$e_0 = e_* + e_e + e_d + \frac{1}{2} \frac{\rho_s}{\rho_0} w^2, \quad (1)$$

$$\rho_0 e_e = \frac{1}{2} \lambda \varepsilon_{ll}^2 + \mu \varepsilon_{ik} \varepsilon_{ik} + K \varepsilon_{ll} \delta \rho + \frac{1}{2} (\gamma + K) \frac{\delta \rho^2}{\rho_0^2},$$

$$\rho_0 e_d = \frac{1}{2} c_1 R^2 + c_2 R \varepsilon_{ll} + c_3 R \frac{\delta \rho}{\rho_0}.$$

Здесь переменные с нулевыми индексами относятся к начальному равновесному состоянию, $\rho = \rho_s + \rho_l$ – плотность двухскоростной среды; $\mathbf{w} = \mathbf{u} - \mathbf{v}$ – относительная скорость фаз; $\lambda, \mu, \gamma, K = \lambda + 2\mu$ – упругие модули насыщенной пористой среды; c_1, c_2, c_3 – энергетические коэффициенты; $e_* = \text{const}$. Следствием уравнения состояния являются соотношения, определяющие давление p , тензор напряжений σ_{ik} и параметр деструкции $\bar{\gamma}$

$$p = K \varepsilon_{ll} + (\gamma + K) \frac{\delta \rho}{\rho_0} + c_3 R, \quad (2)$$

$$\sigma_{ik} = 2\mu \left(\varepsilon_{ik} - \frac{1}{3} \varepsilon_{ll} \delta_{ik} \right) - \gamma \frac{\delta \rho}{\rho_0} \delta_{ik} + c_1 c_4 R \delta_{ik}. \quad (3)$$

$$\bar{\gamma} = c_1 R + c_2 \varepsilon_{ll} + c_3 \delta \rho / \rho_0, \quad (4)$$

Уравнения движения двухскоростной среды с учетом параметра деструкции в приближении малых деформаций имеют вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_s \partial_x u_x + \rho_l \partial_x v_x = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial t} - \partial_x u_x = -\bar{\varphi}_{xx}, \quad \frac{\partial \varepsilon_{yy}}{\partial t} = -\bar{\varphi}_{yy}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} - \frac{1}{\rho_s} \partial_x \sigma_{xx} - \frac{\rho_l}{\rho_s \rho_0} \partial_x p = -\frac{\rho_l}{\rho_s} b w_x, \quad (7)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \partial_x p = b w_x, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{\gamma}}{\partial t} - c_2 \partial_x u_x + c_3 \partial_x v_x = -2c_1 \partial_x^2 \bar{\varphi}_{xx}, \quad (9)$$

Здесь $\rho_s = \rho_* \sqrt{\det(1 - 2\varepsilon_{ik})}$; $\bar{\varphi}_{xx} = \frac{4}{3} \xi (\mu (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) + \partial_{xx}^2 \bar{\gamma})$ – источник пластических деформаций, ξ – пластический модуль; $b = \frac{\eta}{\rho k}$ – коэффициент межфазного трения Дарси, k – пористость. Давление (2) и компоненты тензора напряжений (3) принимают вид

$$p = \left(K - \frac{c_2 c_3}{c_1} \right) \varepsilon_{ll} + \left(\gamma + K - \frac{c_3^2}{c_1} \right) \frac{\delta \rho}{\rho_0} + \frac{c_3}{c_1} \bar{\gamma} \quad (10)$$

$$\sigma_{xx} = 2\mu \varepsilon_{xx} - \left(\frac{2}{3} \mu + c_2 c_4 \right) \varepsilon_{ll} - (\gamma + c_3 c_4) \frac{\delta \rho}{\rho_0} + c_4 \bar{\gamma}, \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{4}{3} \mu (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}), \quad \bar{\sigma}_{yy} = -\frac{1}{2} \bar{\sigma}_{xx}, \quad (12)$$

где $c_4 = (c_2 - c_3)/c_1$.

Численный алгоритм решения системы (5)–(12) основан на методе Рунге - Кутты третьего порядка точности по времени [10]. Аппроксимация по пространству использует WENO реконструкцию для переменных, входящих в потоки гиперболической части уравнений [11], а для остальных производных используется стандартная разностная аппроксимация.

Результаты

Для описания деформированного состояния среды в процессе нагружения рассматривается нестационарная одномерная задача: однородный слой конечной толщины $x \in [X_1, X_2]$. В вертикальном направлении слой неограничен. На границах слоя предполагается $\bar{\gamma} = 0$ и $\partial \bar{\gamma} / \partial x = 0$. Напряжение на левой и правой

границах задано как функция времени $\sigma_{xx} = -P(t)$, $\frac{\rho_l^{ph}}{\rho_0} p = P(t)$. Для случая, когда на жидкость и матрицу действуют различные внешние силы, задаются условия: $\sigma_{xx} = -P_1(t)$, $\frac{\rho_l^{ph}}{\rho_0} p = P_2(t)$. Такие граничные условия характеризуются параметром $Q = P_2/P_1$. Здесь $P(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$ – произвольные функции времени. Физическая плотность насыщающей жидкости ρ_l^{ph} связана с парциальной плотностью ρ_l соотношением $\rho_l = \phi \rho_l^{ph}$, ϕ – пористость.

На простой модели, описывающей деформацию упругого слоя под действием внешних напряжений, показано сильное влияние на характерный масштаб разрушения внешних напряжений, прикладываемых к упругой матрице и к заполняющей ее жидкости. Такая ситуация возникает, например, при взаимодействии резца с горной насыщеннй жидкостью породой. На рис. 1, 2 показаны результаты сравнения эффекта деструкции в сплошных и пористых средах с подобными физическими параметрами. Рис. 1 представляет зависимость поперечных напряжений σ_{yy} от пространственной координаты вглубь слоя (ось L). Координаты максимальных значений определяют масштаб разрушения. Внешнее воздействие к матрице и жидкости прикладывается независимо в соотношении Q . Непосредственно можно наблюдать зависимость характерного масштаба разрушения (координата максимального значения напряжения) от соотношения Q . Рис. 2 представляет зависимость кривизны R от пространственной координаты вглубь слоя. Графики кривизны и напряжения представлены в момент времени 294 мкс.

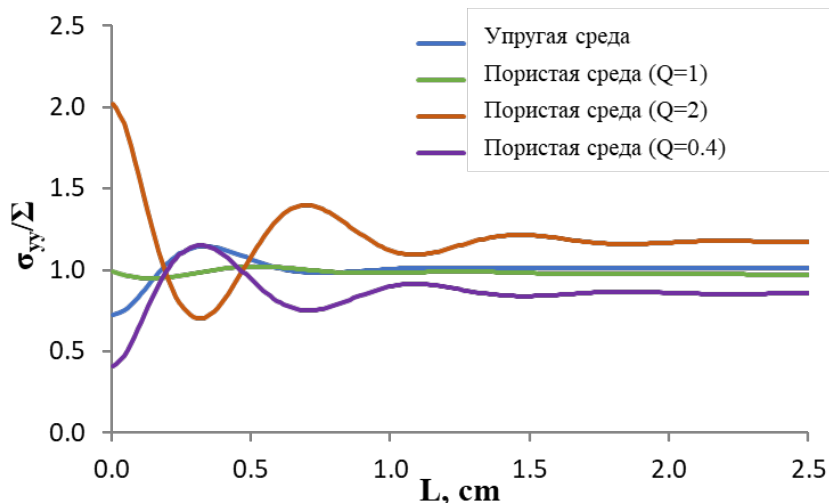


Рис. 1. Напряжения, определяющие масштаб разрушения сплошного и пористых образцов для различных Q

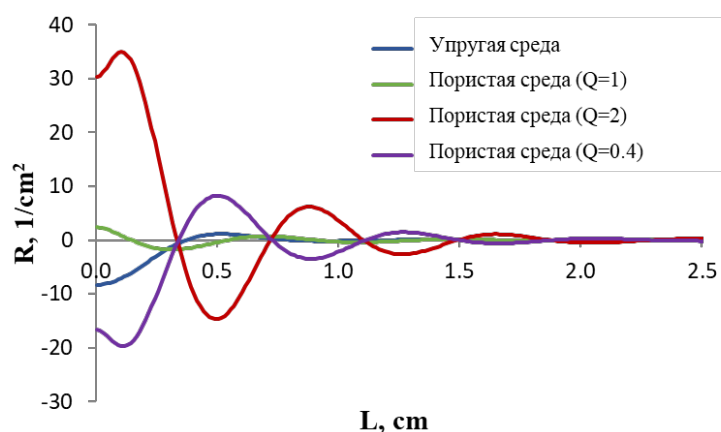


Рис. 2. Кривизна сплошного и пористых образцов для заданного Q

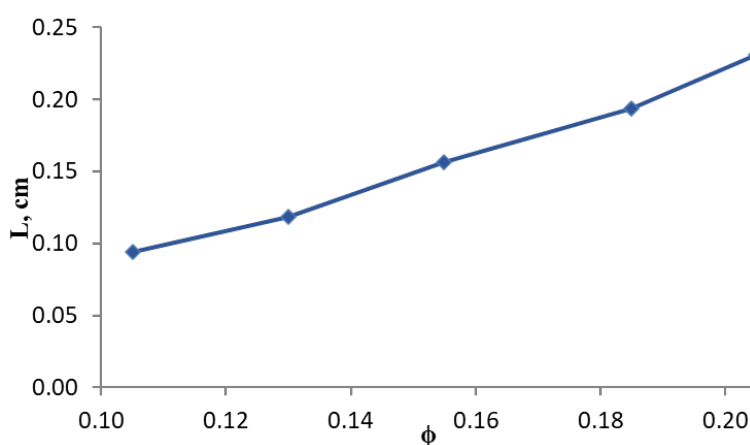


Рис. 3. Характерное расстояние до первой области деструкции в зависимости от пористости.

Расчеты показывают наличие периодической пространственной структуры поперечных напряжений, возникающих в слое при внешних нагрузках на пористую матрицу и жидкость, заполняющую поры. Характерное расстояние для первой области деструкции увеличивается с ростом пористости. Результаты расчетов (рис. 3) демонстрируют сильную зависимость процесса деструкции от параметров пористой среды. Зависимость от проницаемости является достаточно слабой для больших проницаемостей и становится заметной для проницаемостей ниже 100 мД: характерное масштаб для первой области деструкции слабо растет с уменьшением проницаемости. Управлять величиной эффекта можно за счет вариации различной степени внешнего воздействия на фазы насыщенной пористой среды. Важно отметить, что для достижения более высоких значений напряжений в области деструкции необходимо создавать большее различие в давлении на отдельные фазы. Характерный масштаб разрушения можно увеличить, увеличивая давление на насыщающую жидкость. Анализ поведения этих параметров позволит понять поведение кривизны, а значит предсказать характер деструкции.

Заключение

В настоящей работе общие идеи нелокальной теории упругости применяются для построения нелокальной теории деформации насыщенной жидкостью пористой среды. Метод законов сохранения позволяет получить термодинамически согласованные дифференциальные уравнения модели деструкции пористой среды. В развитой модели помимо тензоров напряжений и деформаций вводится тензор кривизны, посредством которого учитывается нелокальность деформаций. Кривизна может быть связана с параметром разрушения. Численный алгоритм решения уравнений основан на методе Рунге - Кутты третьего порядка по времени и WENO реконструкции для аппроксимации по пространству. Производные высших порядков аппроксимируются конечными разностями. Численно исследована одномерная задача о деформации конечного слоя, нагруженного нормальным поверхностным напряжением. Показано формирование периодических зон деструкции насыщенных жидкостью пористых пород с характерным пространственным масштабом. Показано, что характерный масштаб разрушения зависит от пористости породы, а также от давления в поровой жидкости. Модель может быть применена к изучению проблемы разрушения горных пород.

Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН №122041400237-8 при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Годунов С. К., Роменский Е. И. Элементы механики сплошных сред и законы сохранения. – Новосибирск: Научная книга. 1998. – 280 с.
2. Dorovsky V. N. Mathematical Models of Two-Velocity Media. I // Mathl. Comput. Modelling. –1995– V. 21. - No. 7. – P.17–28.
3. Dorovsky V. N., Perepechko Yu. V. Mathematical Models of Two-Velocity Media. II // Mathl. Comput. Modelling. –1996. – V. 24. – No.10. – P. 69–80.
4. Шемякин Е. И., Фисенко Г. Л., Курленя М. В., Опарин В. Н., Рева В. Н., Глушихин Ф. П., Розенбаум М. А., Тропп З. А. Зональное разрушение горных пород вокруг шахт. Часть 1. Данные полевых исследований // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. –1986. – № 3. – С. 3–15.
5. Tan Y. L., Ning J. G., Li H. T. In situ explorations on zonal disintegration of roof strata in deep coal mines // Intern. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2012– V. 49. – No. 1. – P. 113–124.
6. Гузев М. А., Парошин А. А. Неевклидова модель зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземной выработки // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42. – № 1. – С. 147–156.
7. Циху Ц., Чжу К., Кси Е. Влияние горизонтальных напряжений на явление зональной дезинтеграции горных пород в массиве с выработкой круглого сечения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. –2012. – № 2. – С. 88–97.
8. Zhou X. P., Shou Y. D. Excavation induced zonal disintegration of the surrounding rock around a deep circular tunnel considering unloading effect // Intern. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2013. – V. 64. – P. 246–257.

9. Dorovsky V., Romensky E., Sinev A. Spatially non-local model of inelastic deformations: applications for rock failure problem // Geophysical prospecting. – 2015 – V. 63. – No. 5. – P.1198–1212.

10. Доровский В. Н., Роменский Е. И., Федоров А. И., Перепечко Ю. В. Резонансный метод измерения проницаемости горных пород // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 8. – С. 950–961.

11. Shu C.W. Essentially non-oscillatory and weighted essentially non-oscillatory schemes for hyperbolic conservation laws // NASA/CR-97-206253. ICASE Report, 1997. – P. 97–65.

© Ю. В. Перепечко, В. Н. Доровский, 2026

А. С. Хорунженко^{1✉}

Влияние силы Кориолиса на распространение цунами в Японском море

¹Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.khorunzhenko@g.nsu.ru

Аннотация. Численно исследуется влияние силы Кориолиса на распространение цунами в Японском море методом Мак-Кормака на регулярной широтно-долготной сетке в сферических координатах. Корректность реализации кориолисова члена проверена в контролируемом сравнительном тесте на плоской волне «юг–север» (амплитуда 1 м, скорость течения в волне $\approx 0,099$ м/с, центральная широта 45°). диаграмма Ховмёллера u -компоненты скорости вдоль меридианной полосы в центре расчётной области показывает, что в расчёте без Кориолиса u остаётся на уровне численного шума, а в расчёте с Кориолисом за прохождением фронта волны накапливается положительная u -компонента $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ м/с, согласующаяся с теоретической оценкой $\Delta u = f \cdot v_0 \cdot T_{pulse}$. На сценарии с модельным эллипсоидным источником в южной части Японского моря пиковые прибрежные амплитуды отличаются в пределах 1–2 %, а поточечная синхронная разность поля свободной поверхности $\eta_{cor}(x, y, t) - \eta_{noCor}(x, y, t)$ в ближней зоне источника достигает 1,6 м. Расширенный анализ с тестом «запад–восток» и оценкой сходимости планируется в отдельной публикации.

Ключевые слова: цунами, уравнения мелкой воды, сила Кориолиса, схема Мак-Кормака, Японское море

A. S. Khorunzhenko^{1✉}

Impact of the coriolis force on tsunami propagation in the Japan Sea

¹Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.khorunzhenko@g.nsu.ru

Abstract. The impact of the Coriolis force on tsunami propagation in the Japan Sea is investigated numerically using a MacCormack shallow-water solver on a regular latitude-longitude grid in spherical coordinates. Correct implementation of the Coriolis term is verified in a controlled comparison test on a south-to-north plane wave (1 m amplitude, ≈ 0.099 m/s meridional velocity, central latitude 45° N). A Hovmöller diagram of the velocity component along the parallel (u -component) over a meridional strip in the centre of the computational domain shows that without Coriolis u remains at the level of numerical noise, whereas with Coriolis a positive u -component of about $2 \cdot 10^{-3}$ m/s accumulates behind the propagating wave front, in agreement with the theoretical estimate $\Delta u = f \cdot v_0 \cdot T_{pulse}$. For a model ellipsoidal source in the southern Japan Sea peak coastal amplitudes differ between the two runs by 1–2 %, while synchronous pointwise differences $\eta_{cor}(x, y, t) - \eta_{noCor}(x, y, t)$ of the free-surface field near the source reach 1.6 m. Extended analysis with a west–east test and convergence study is planned in a follow-up publication.

Keywords: tsunami, shallow-water equations, Coriolis force, MacCormack scheme, Japan Sea

Введение

Современные вычислительные системы позволяют проводить детальное численное моделирование распространения цунами практически в реальном времени [1, 2, 3]. При расчёте для крупных акваторий с мелким пространственным шагом возникают два вопроса: о вычислительных ресурсах и о том, какие члены уравнений мелкой воды существенны для достоверного описания распределения высот волн вдоль побережий. Эффект силы Кориолиса в открытом океане на малых временах часто полагается малым, однако для средне-высоких широт и характерных масштабов, сопоставимых с радиусом деформации Россби, его вклад становится количественно заметным [4, 5, 6]. Для Японского моря (широтный диапазон 33–53°) период инерции $\frac{2\pi}{f}$ на широте 45° составляет около 17 часов, а баротропный (внешний) радиус деформации Россби $R_d = \frac{c}{f}$ при средней глубине около 1 км – порядка 960 км, т. е. близок к характерному горизонтальному размеру самой акватории. Таким образом, для Японского моря оправдан целевой анализ вклада силы Кориолиса.

Цель настоящей работы – количественно исследовать влияние силы Кориолиса на распространение цунами в Японском море. Настоящая работа продолжает исследования автора и соавторов по численному моделированию цунами с помощью декомпозиции расчётной области на перекрывающиеся подобласти [7], что позволяет проводить вычислительные эксперименты на ресурсах персонального компьютера.

Методы и материалы

В качестве модели используются нелинейные уравнения мелкой воды [4, 5] с учётом силы Кориолиса в уравнениях импульса:

$$H(x, y, t) = \eta(x, y, t) + D(x, y), \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - f v = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + f u = 0. \quad (4)$$

Здесь H – полная толщина слоя воды; η – возмущение свободной поверхности; D – глубина (батиметрия); u , v – компоненты скорости потока воды (u – вдоль параллели, положительное на восток; v – вдоль меридиана, положительное на север); g – ускорение свободного падения; $f = 2\Omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса; Ω – угловая скорость вращения Земли (приблизительно $7,29 \cdot 10^{-5}$ рад/с); φ – широта. При переходе к сферическим координатам локальный шаг по долготе

(по оси восток–запад) дополнительно масштабируется множителем $\cos \varphi$, что учитывает сужение параллелей при удалении от экватора.

Для численного решения используется двухшаговая конечно-разностная схема Мак-Кормака [8] с промежуточным и полным временными слоями. Расчётная область делится на перекрывающиеся полосы (вертикальные или горизонтальные в зависимости от направления преобладающего переноса), как описано в предыдущей работе автора и соавторов [7]. На внешних границах во всех представленных расчётах используется условие свободного выхода волны (нулевой градиент полей по нормали к границе). Для сравнения постановок «с учётом Кориолиса» и «без учёта Кориолиса» в обоих расчётах используется одна и та же регулярная широтно-долготная сетка в сферических координатах, одинаковые шаги по пространству и времени, идентичные начальные и граничные условия; единственное различие – значение параметра f в уравнениях (3), (4). Все вычислительные эксперименты выполнены в оптимизированной сборке компилятора с включёнными оптимизациями на многоядерном процессоре общего назначения.

Результаты

1. Тестовый расчёт с плоской волной.

Расчётная сетка – 4500×3000 узлов с шагом 1 км по обоим направлениям, центральная широта 45° с.ш., постоянная глубина 1000 м. Для исключения угловых артефактов двумерной экстраполяции открытой границы анализ и визуализация проводятся в центральной зоне размером 2500×3000 км (центральные 2500 столбцов i из диапазона $[1000, 3500]$). Начальное возмущение – плоская волна высотой $\eta_0 = 1$ м, однородная по долготе, шириной 15 км по меридиану, с начальной скоростью течения в волне (v -компонентой, вдоль меридиана) $v_0 = +\frac{c\eta_0}{D} \approx +0,099$ м/с (плоская волна, бегущая на север). u -компонента скорости (вдоль параллели) в начальный момент равна нулю. Постановка плоской волны, однородной по долготе, не имеет поперечных краёв источника по долготе, что обеспечивает отсутствие краевых искажений во внутренней области интегрирования. На всех четырёх границах применяется условие свободного выхода волны (нулевой градиент по нормали), описанное в Методах. Шаг по времени $\tau = 5$ с, расчёт ведётся на протяжении 10 000 шагов по времени ($50\,000$ с ≈ 14 часов модельного времени, что соответствует приблизительно 0,8 инерционного периода $\frac{2\pi}{f} \approx 17$ часов на 45° с.ш.). Сохраняются покадровые снимки полей η , u , v каждые 125 шагов по времени (80 кадров за расчёт, шаг между снимками ≈ 10 мин), а также итоговые поля максимумов $\max \eta$, $\max |u|$, $\max |v|$, отслеживаемые на каждом шаге. Проведено два расчёта на одной и той же сетке: с учётом и без учёта силы Кориолиса.

Численные значения максимумов в обоих расчётах показывают, что пиковые величины амплитуды свободной поверхности $\eta_{\max}$ и максимумов модуля v -компоненты скорости (вдоль меридиана, юг–север) $\max |v|$ в расчётах с учётом и без учёта силы Кориолиса близки между собой: $\eta_{\max} \approx 1,234$ м с Кориолисом

и $\eta_{max} \approx 1,217$ м без него, $\max|v| \approx 0,12$ м/с в обоих (превышение η_{max} над начальной амплитудой $\eta_0 = 1$ м связано с численным overshoot — дисперсионными осцилляциями схемы Мак-Кормака на резком top-hat-фронте начального возмущения; $\max|v|$ согласуется с η_{max} через линейное соотношение $v \approx c \cdot \eta / D$). Сантиметровая разница η_{max} между двумя расчётами (0,017 м) находится на уровне этого численного overshoot и не интерпретируется как физический кориолисов сигнал в η . Для совместного представления пространственной и временной структуры u -компоненты используется диаграмма Ховмёллера [9] — двумерная карта поля «пространство–время», на которой одна ось — время, другая — пространственная координата (в данной работе t по горизонтали и j вдоль меридиана по вертикали при фиксированной долготе $i = 2250 \pm 10$; в литературе встречается и транспонированная ориентация). Цвет в каждой точке карты соответствует значению поля $u(j, t)$ в данном узле и в данный момент модельного времени; этот формат стандартен в метеорологии и физической океанографии для визуализации распространяющихся волновых сигналов и был введён Е. Хёвмёллером в 1949 г. На рис. 1 видно качественное различие в u -компоненте скорости (вдоль параллели, восток–запад) между двумя расчётами. В расчёте без Кориолиса u остаётся на уровне численного шума $\approx 3 \cdot 10^{-5}$ м/с по всей расчётной области; в расчёте с Кориолисом за прохождением фронта накапливается положительная u -компонента, выходящая на плато $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ м/с. Соотношение пиков $\max|u|$ между двумя расчётами составляет $\approx 75\times$ и согласуется по порядку с линейной оценкой $\Delta u = f \cdot v_0 \cdot T_{pulse} \approx 1,54 \cdot 10^{-3}$ м/с при ширине источника $L_y = 15$ км, $c \approx 99$ м/с, $f = 1,03 \cdot 10^{-4}$ с $^{-1}$, $v_0 = 0,099$ м/с ($T_{pulse} = L_y / c \approx 151$ с — время прохождения фронта через фиксированный узел сетки). Превышение наблюдаемого $\max|u| \approx 2,24 \cdot 10^{-3}$ м/с над оценкой в $\sim 1,45$ раза соответствует тому, что в численном решении пиковая v -компонента в волне выше формальной v_0 из-за того же дисперсионного overshoot, что и в η_{max} . Это даёт количественное подтверждение корректной реализации кориолисова члена и физически согласуется с теорией: для плоской волны, однородной по долготе, сила Кориолиса в первом порядке по малому параметру $\varepsilon = f \cdot T_{pulse} \approx 1,6 \cdot 10^{-2}$ генерирует только u -компоненту, а отклик в основной паре полей (η, v) распространяющегося импульса возникает лишь во втором порядке ($\varepsilon^2 \approx 2,4 \cdot 10^{-4}$, субмиллиметровый эффект для $\eta \sim 1$ м). В рассмотренной постановке используется f -плоскость с постоянным $f = f(45^\circ)$; влияние широтной изменчивости f (β -эффекта) в этом контролируемом тесте не анализировалось.

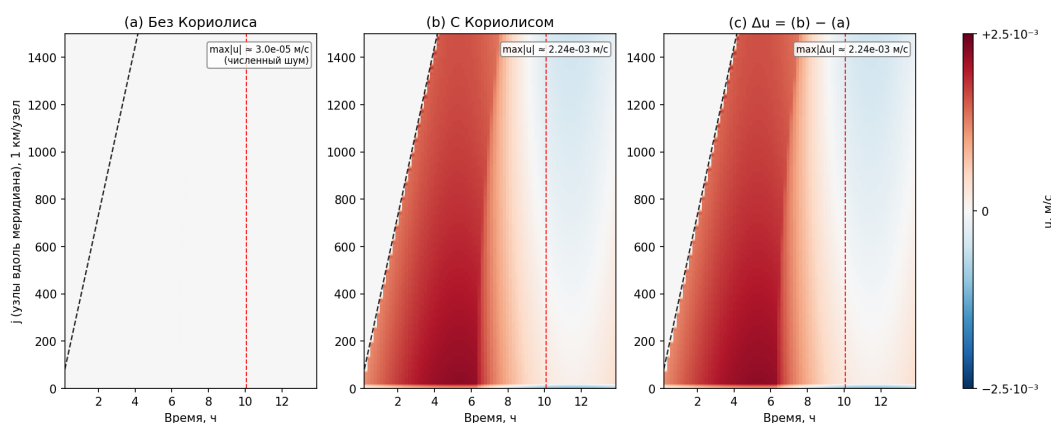


Рис. 1. Диаграмма Ховмёллера [9] $u(j, t)$ для центральной полосы $i = 2250 \pm 10$: (а) без Кориолиса, (б) с Кориолисом, (с) разность $\Delta u = (b) - (a)$.

Чёрная штриховая линия – положение переднего фронта $j_{\text{front}}(t) = 20 + c \cdot t / \Delta y$, $\Delta y = 1 \text{ км}$ – шаг сетки по меридиану, $c = \sqrt{g \cdot D} \approx 99 \text{ м/с}$. Красная штриховая вертикаль – момент $t = 10 \text{ ч}$. На каждой панели в правом верхнем углу указан $\max|u|$ по показанному фрагменту. Цветовая шкала $\pm 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ одинакова для всех трёх панелей.

2. Сценарий с модельным эллипсовидным источником в Японском море.

Расчётная область включает всё Японское море ($33,0^\circ$ – $53,0^\circ$ с.ш., $127,3^\circ$ – $142,3^\circ$ в.д.). Батиметрия взята из глобальной цифровой батиметрии GEBCO-2024 [10] с пространственным шагом $0,0041667^\circ$, что соответствует сетке 3601×4801 узлов. Шаг по времени $\tau = 0,5 \text{ с}$, всего 25 000 шагов ($\approx 3,5 \text{ ч}$ времени распространения волны). Модельный источник – эллипсовидное начальное поднятие свободной поверхности с амплитудой 2 м, полуосями $0,148^\circ$ и $0,449^\circ$ и ориентацией главной оси под углом -80° к меридиану; центр источника расположен в точке ($132,0^\circ$ в.д., $36,0^\circ$ с.ш.) – в глубоководной области южной части Японского моря, приблизительно в 100 км к северо-западу от префектуры Симане (о. Хонсю) и в 235 км к востоку от восточного побережья Корейского полуострова. Сценарий рассчитан дважды – с учётом и без учёта силы Кориолиса на одной и той же регулярной широтно-долготной сетке в сферических координатах (см. Методы).

Глобальные максимумы амплитуды сопоставимы: $\max \eta$ с учётом Кориолиса = 3,370 м, без учёта = 3,359 м. Таким образом, сила Кориолиса не меняет порядок пикового значения в ближней зоне источника, но перераспределяет энергию во времени и пространстве – поточечный максимум синхронной разности достигает 1,602 м. Основная локализация наблюдаемого отличия – ближняя зона источника.

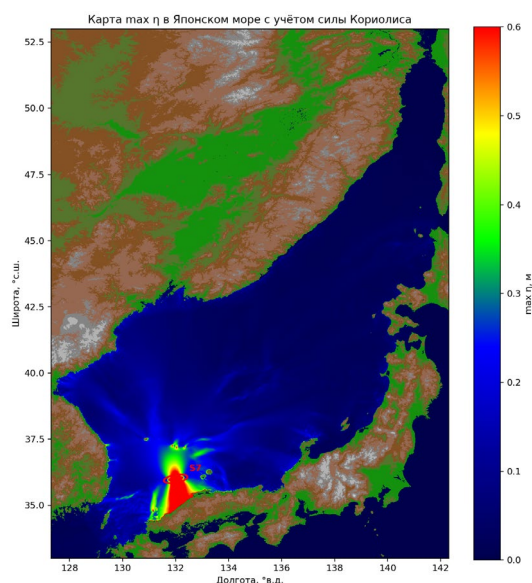


Рис. 2. Карта $\max \eta$ в Японском море с учётом силы Кориолиса. Шкала насыщена на 0,6 м; локальный пик вблизи источника 3,37 м.

3. Высоты вдоль побережий.

Для оценки влияния силы Кориолиса на максимальные высоты волны у побережий выбраны две контрольных линии: западное (со стороны Японского моря) побережье Хонсю вблизи модельного источника и Приморье от Владивостока до Рудной Пристани. Контрольные линии показаны на рис. 3. Распределения максимальных рассчитанных высот вдоль этих линий приведены на рис. 4, 5.

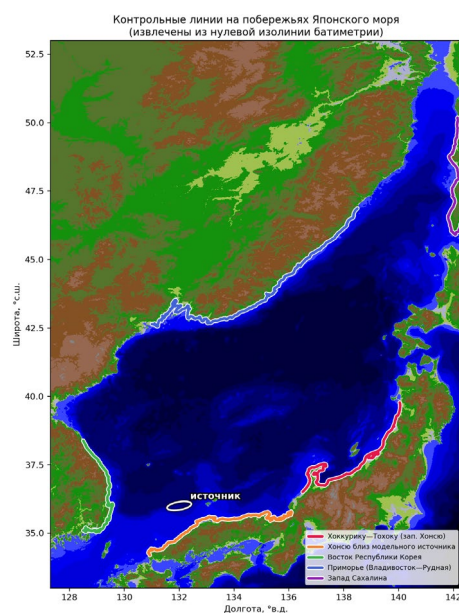


Рис. 3. Контрольные береговые линии и положение модельного источника (эллипс).

Сводная количественная картина такова. На обеих контрольных линиях пиковые рассчитанные высоты η_{max} , полученные с учётом и без учёта силы Кориолиса, отличаются в пределах 1–2 %: различия заключены в локальном перераспределении высоты, а не в систематическом усилении или ослаблении.

Максимум поточечной (вдоль линии) разности кривых достигает 0,15 м на линии «Хонсю вблизи модельного источника» и 0,02 м на линии Приморье. Физически наблюдаемая картина согласуется с теорией вращающегося океана: сила Кориолиса порождает поперечную (восточно-западную) компоненту скорости и приводит к фазовому и пространственному перераспределению поля волны, вследствие чего поточечная разность между расчётами существенна, но интегральный пиковый эффект при рассмотренных характеристиках источника и акватории оказывается небольшим.



Рис. 4. Распределения максимальных рассчитанных высот вдоль береговой линии Хонсю вблизи источника.

Верх – высоты с/без Кориолиса, низ – разность.



Рис. 5. Распределения максимальных рассчитанных высот вдоль двух береговой линии Приморья.

Верх – высоты с/без Кориолиса, низ – разность.

Обсуждение

Контролируемый тест плоской волны качественно согласуется с линейной теорией вращающегося океана. Теоретическая оценка $\Delta u = f \cdot v_0 \cdot T_{\text{pulse}}$, $T_{\text{pulse}} = L_y / c$ при $f = 1,03 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $v_0 = 0,099 \text{ м/с}$, $L_y = 15 \text{ км}$ и $c \approx 99 \text{ м/с}$ даёт наработанную u -компоненту (вдоль параллели) $\approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$, что согласуется по порядку величины с пиковым численным $\max|u| \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ в расчёте с Кориолисом и качественно подтверждает корректную реализацию кориолисова члена. Диаграмма Ховмёллера $u(j, t)$ наглядно демонстрирует пространственно-временную структуру сигнала: за прохождением волнового фронта u выходит на плато $\approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ в расчёте с Кориолисом, тогда как в расчёте без Кориолиса u остаётся на уровне численного шума $\approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$. На временах меньше инерционного периода ($\approx 17 \text{ ч}$ на 45° с.ш.) пиковые прибрежные высоты изменяются слабо: основной эффект – локальное перераспределение энергии во времени и пространстве. Сопоставимость радиуса деформации Россби с горизонтальным масштабом Японского моря (см. Введение) обуславливает заметное проявление силы Кориолиса именно для рассмотренной акватории.

Заключение

Проведено исследование влияния силы Кориолиса на распространение цунами в Японском море при использовании схемы Мак-Кормака на регулярной широтно-долготной сетке в сферических координатах с декомпозицией расчётной области на полосы. Корректность включения силы Кориолиса подтверждена контролируемым тестом с плоской волной, бегущей на север с начальной скоростью течения в волне (v -компонентой, вдоль меридиана) $v_0 = +0,099 \text{ м/с}$ при однородном по долготе источнике: пиковые величины η_{max} и $\max|v|$ в обоих расчётах близки между собой (разность η_{max} составляет около $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, что соответствует $\approx 1,4 \%$ от пикового значения), а $\max|u|$ резко различается: $\approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ с Кориолисом против $\approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ без него – соотношение порядка семидесяти, согласующееся с теоретической оценкой $\Delta u = f \cdot v_0 \cdot T_{\text{pulse}}$. Для сценария с модельным эллипсовидным источником в южной части Японского моря на временных масштабах, существенно меньших инерционного периода (около 17 часов на 45° с.ш.), при заданных характеристиках источника и батиметрии глобальные пиковые амплитуды изменяются незначительно (порядка трёх метров в обоих случаях), поточечная синхронная разность в ближней зоне источника достигает значений порядка полутора метров, а вдоль рассмотренных береговых линий пиковые рассчитанные высоты η_{max} отличаются в пределах одного-двух процентов. Таким образом, эффект силы Кориолиса на рассмотренных масштабах проявляется преимущественно как локальное перераспределение амплитуды во времени и пространстве, а не как систематическое усиление прибрежных пиков. Полученные количественные оценки относятся к рассмотренному масштабу акватории и заданным характеристикам источника и могут служить ориентиром при интерпретации численных расчётов: для задач, в которых существенна поточечная согласованность с наблюдаемой волной (верификация мареографов, синхронный мониторинг), вклад силы Кориолиса должен учитываться

в явном виде, особенно при модельных временах, сопоставимых с частью инерционного периода.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственных заданий Института автоматизации и электрометрии СО РАН (№ FWNG-2024-0014) и Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (№ FWNM-2025-0004).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Titov V. V., Gonzalez F. I. Implementation and testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) model. – Seattle : NOAA/Pacific Marine Environmental Laboratory, 1997. – NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112.
2. Wang X., Power W. L. COMCOT: a tsunami generation, propagation and run-up model. – Lower Hutt : GNS Science, 2011. — GNS Science Report 2011/43.
3. Shuto N., Goto C., Imamura F. Numerical simulation as a means of warning for near-field tsunamis // Coastal Engineering in Japan. – 1990. – Vol. 33. – No. 2. – P. 173-193.
4. Stoker J. J. Water Waves: The Mathematical Theory with Applications. – New York : Interscience Publishers, 1957.
5. Kowalik Z., Murty T. S. Numerical Modeling of Ocean Dynamics. – Singapore : World Scientific, 1993.
6. Pedlosky J. Geophysical Fluid Dynamics. –2nd ed. –New York : Springer-Verlag, 1987.
7. Khorunzhenko A., Lavrentiev M. M., Marchuk A. The tsunami wave calculation in large domains by grid decomposition // OCEANS 2025 –Brest : proceedings, Brest, 16–19 June 2025. – IEEE, 2025.
8. MacCormack R. W., Paullay A. J. Computational efficiency achieved by time splitting of finite-difference operators. – 1972. – AIAA Paper No. – 72-154.
9. Hovmöller E. The trough-and-ridge diagram // Tellus. –1949. –V. 1. – No. 2. –P. 62–66. – DOI: 10.3402/tellusa.v1i2.8498.
10. GEBCO Compilation Group. The GEBCO_2024 Grid: a continuous terrain model of the global oceans and land. –Liverpool : NERC EDS British Oceanographic Data Centre, 2024. –DOI: 10.5285/1c44ce99-0a0d-5f4f-e063-7086abc0ea0f.

© А. С. Хорунженко, 2026

Э. Н. Шорина^{1,2✉}, Д. М. Евменова², И. Н. Ельцов^{2,3}, С. А. Имашев⁴, А. А. Якименко³

Разработка программного инструментария для анализа индикаторов землетрясений по данным электромагнитного мониторинга на Бишкекском геодинамическом полигоне

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

⁴Научная станция РАН, г. Бишкек, Киргизская Республика
e-mail: e.shorina@g.nsu.ru

Аннотация. В работе предложен и протестирован метод анализа индикаторов сейсмической активности, который основывается на анализе электромагнитного мониторинга, выполненного на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП) Научной станцией РАН в г. Бишкек, Киргизская Республика. Предлагаемый метод учитывает геоэлектрическое состояние среды на разных глубинах и дает возможность выявлять зоны, имеющие повышенную чувствительность к геодинамическим процессам. В работе были использованы данные зондирования, полученные методом становления электромагнитного поля на БГП за 2017 и 2022 годы. Выделены нормальные и аномальные сигналы, а также рассмотрены причины, из-за которых появляются отклонения на графиках мониторинга: сейсмическая и грозовая активность и воздействие магнитных бурь. На основе анализа исходных данных разработан автоматизированный расчет индикаторов сейсмического события для всех пунктов. Результаты данных расчетов, представленные в виде дополнительного блока «Платформы для работы с данными электромагнитного зондирования и сейсмологии – ПЛЭС».

Ключевые слова: Бишкекский геодинамический полигон, электромагнитный мониторинг, индикаторы, прогноз землетрясений, землетрясение, становление поля, автоматизированный подсчет, цифровая платформа

E. N. Shorina^{1,2✉}, D. M. Evmenova², I.N. Yeltsov^{2,3}, S. A. Imashev⁴, A. A. Yakimenko³

Development of software tools for analyzing earthquake indicators based on electromagnetic monitoring data at the Bishkek geodynamic polygon

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

⁴Research station of the RAS, Bishkek, Kyrgyz Republic
e-mail: e.shorina@g.nsu.ru

Abstract. The paper proposes and tests a method for analyzing indicators of seismic activity, which is based on the analysis of electromagnetic monitoring performed on the territory of the Bishkek Geodynamic Polygon (BGP) by the Scientific Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Kyrgyz Republic. The proposed method takes into account the geoelectric state of the medium at different depths and makes it possible to identify zones with increased sensitivity to geodynamic

processes. The work used sounding data obtained by the method of electromagnetic field formation at the BGP for 2017 and 2022. Normal and anomaly signals are highlighted, and the causes of deviations in monitoring schedules are considered: seismic and thunderstorm activity and the effects of magnetic storms. Based on the analysis of the initial data, an automated calculation of seismic event indicators for all points has been developed. The results of these calculations are presented in the form of an additional block "Multi-user platform for processing and analyzing electromagnetic soundings and seismological observations – PLES".

Keywords: Bishkek geodynamic polygon, electromagnetic monitoring, indicators, earthquake prediction, earthquake, transient electromagnetic method, automated calculation, digital platform

Введение

Землетрясения остаются одной из серьезных угроз для населения Земли, вследствие чего требуется совершенствование методов анализа данных мониторинга сейсмических событий [1]. Эти данные получают на специальных прогностических полигонах, располагающихся в сейсмоактивных областях. Полигоны созданы для того, чтобы выявить взаимосвязи изменений параметров среды для выявления сейсмической активности и прогнозирования землетрясений. Геофизиками обрабатываются геофизические, в частности, электромагнитные, данные с пунктов наблюдения Бишкекского геодинамического полигона (БГП). БГП – экспериментальный полигон, располагающийся на научной станции РАН неподалеку от г. Бишкек в одной из сейсмоактивных областей Северного Тянь-Шаня. Данные, получаемые с БГП, содержат огромное количество информации, требующие внедрения автоматизированных цифровых решений.

Отклонения в электромагнитных откликах сейсмогенной среды, которые фиксируются на пунктах наблюдения БГП могут быть вызваны как с повышенным трещинообразованием при подготовке землетрясения, так и внешними факторами, такими как грозы и магнитные бури [2]. Многообразие причин отклонений усложняет анализ и требует специализированных инструментов для быстрого выделения ключевых индикаторов сейсмической активности.

Измерения на БГП ведутся более 40 лет, накоплено огромное количество данных. Ручная обработка является трудоёмким и ресурсозатратным процессом, поэтому в ИВМиМГ СО РАН ведется разработка цифровой платформы для автоматического построения индикаторов ожидаемых сейсмических событий [3]. На сегодняшний день одной из актуальных задач является создание программного блока, который будет вести автоматизированный расчёт индикаторов сейсмического события по данным электромагнитного мониторинга геологической среды.

Методы и материалы

Бишкекский геодинамический полигон (БГП), лежит в пределах центрального сегмента Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенерирующей зоны и представляет собой прогностический полигон [1].

БГП характеризуется активной сейсмичностью, вызванной современными деформациями. На его территории работает сейсмологическая сеть KNET, регистрирующая локальную и региональную сейсмичность.

На БГП располагаются стационарные пункты наблюдения, в которых проводят и собирают данные электромагнитного мониторинга: Кегеты, Иссык-Ата, Таш-Башат, Чункурчак, Шавай и Ак-Суу. Сбор информации на этих пунктах осуществляется ежедневно, кроме выходных и праздничных дней, по несколько сеансов в день.

Для выявления связи между данными электромагнитного мониторинга и сейсмическими событиями предложено использовать индикаторы ожидаемого сейсмического события [4, 5]:

1) Время прихода максимального значения сигнала (ВПМ) – максимальное значение кажущегося сопротивления в полученных данных в течении суток максимальная точка на графике кривой становления поля;

2) Вольт-временная характеристика (ВВХ) – это площадь под графиком, которая представляет собой зависимость от электрического сопротивления;

3) Средний доверительный интервал (СДИ), который характеризует отклонение в электромагнитных данных от нормы в сутки в рамках определенных значений.

Данные электромагнитного мониторинга и индикаторов регистрируются и доступны на «Многопользовательской платформе для обработки и анализа электромагнитных зондирований и сейсмологических наблюдений – ПЛЭС» [6]. С помощью платформы можно анализировать данные за любой период/дату, пункт наблюдения, каталог данных, энергетический класс и индикаторы сейсмической активности.

Для дальнейшего развития и улучшения работы с данными был разработан дополнительный блок с реакцией индикаторов на ожидаемое сейсмическое событие.

Для реализации этого блока были взяты данные индикаторов сейсмического события и для дальнейшего подсчета количества срабатывающих индикаторов бралась разность данных электромагнитного мониторинга последующего из предыдущего дней. Если разность между значениями индикаторов за эти дни различались на 0.2 и более, то считалось, что индикатор «сработал». Тогда в промежуточную таблицу прописывалась 1. Но если значение разницы было меньше 0.2, то ставился 0 и считалось, что индикатор «не сработал», а 0.2 было получено эмпирическим путем. Далее «сработал» (1) и «не сработал» (0) всех индикаторов (ВПМ, ВВХ и СДИ) суммировались, и в таблицу выводилось суммарное количество индикаторов.

При анализе таблицы можно увидеть, что чаще всего срабатывал один индикатор из трех, а реже всего сразу срабатывали три индикатора. Были такие случаи, когда в один день могли сработать индикаторы сразу на всех пунктах и наоборот, срабатывали индикаторы на одном пункте из девяти. Событие имеет

глобальный характер, если индикаторы срабатывают на двух или более пунктах одновременно, и локальный, если только на одном.

Результаты

Построены кривые становления электромагнитного поля за 2017 год. Данные за этот год рассматриваются, так как в нем было крупное событие – Кегетинское землетрясение и много других событий. Под нормальными кривыми имеются в виду те кривые становления электромагнитного поля, которые имеют типичную форму для данного сигнала, где не наблюдается резких изменений и расхождения сигналов, измеренных в разное время суток более, чем на 2 Ом·м. Аномальные кривые характеризуются существенными отклонениями формы сигнала от формы нормальных кривых.

Отклонения на аномальных графиках электромагнитных данных могут возникать из-за сейсмических событий, гроз, геомагнитной активности или неполадок измерительной техники.

Магнитные бури способны как маскировать, так и усиливать отклонения иного происхождения. Грозы, особенно в дождливые периоды, также приводят к искажению результатов измерений.

Наиболее важной причиной вариаций является сейсмическая активность. Это можно увидеть в данных от 21 апреля 2017 года, когда в 4 км от пункта Кегеты произошло сильное землетрясение (энергетический класс (К)>8).

Геомагнитная активность (магнитные бури) является ещё одним фактором появления аномалий. Её уровень оценивают по индексу A_p и чем сильнее активность, тем он выше. Геомагнитная активность чаще наблюдается зимой, весной и осенью, тогда как грозы влияют на электромагнитный мониторинг преимущественно летом.

Дополнительный модуль нужен для обработки электромагнитных данных, поступающих со станций наблюдения. Главная задача состоит в корректном выводе о срабатывании индикаторов.

Первый этап – загрузка и настройка параметров: импорт библиотек и данных.

Второй этап – сбор и преобразование дат. Проверяется каждый Excel-файл на его наличие, затем он читается и полученные даты из файла отправляются в набор с датами `datetime`. Формируется список всех пунктов и указываются три рассчитываемых параметра (ВВХ, ВПМ, СДИ). Задается пороговое значение 0.2 (значение подобрано эмпирически) для оценки изменений показаний.

Третий этап – обработка данных. Программа проходит по всем данным и выполняет последовательные действия: сначала вычисляет разницу данных за соседние дни, затем сравнивает эту разницу с пороговым значением (если значение 0.2 превышено, то ставится 1, если нет, то 0), и в самом конце считает сумму нулей и единиц для трёх индикаторов. В итоге получается число от 0 до 3, что отражает уровень сейсмической активности.

Четвертый этап – создание таблицы: транспонируются все данные и сохраняются в файл.

Пятый этап – визуализация результата. Обработанные данные сводятся в единую таблицу с цветовой индикацией (рис.1).

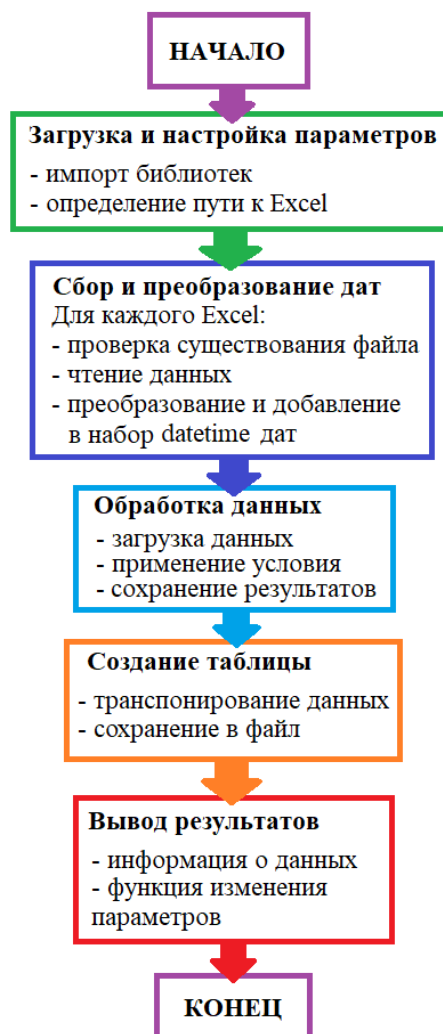


Рис. 1. Блок-схема программного инструментария

Для реализации программного инструментария был использован язык программирования Python. Для реализации вычислительного блока применялись клиент-серверный подход на основе веб-фреймворка Flask [7, 8].

Итоговый внешний вид программного инструментария выглядит следующим образом: блок разницы значения индикатора, блок диапазона дат, блок выбора пунктов, где можно выбрать все или несколько пунктов сети БГП, и блок с выведенными таблицей и графиком (рис. 2).

ИТОГОВАЯ ТАБЛИЦА ДАННЫХ

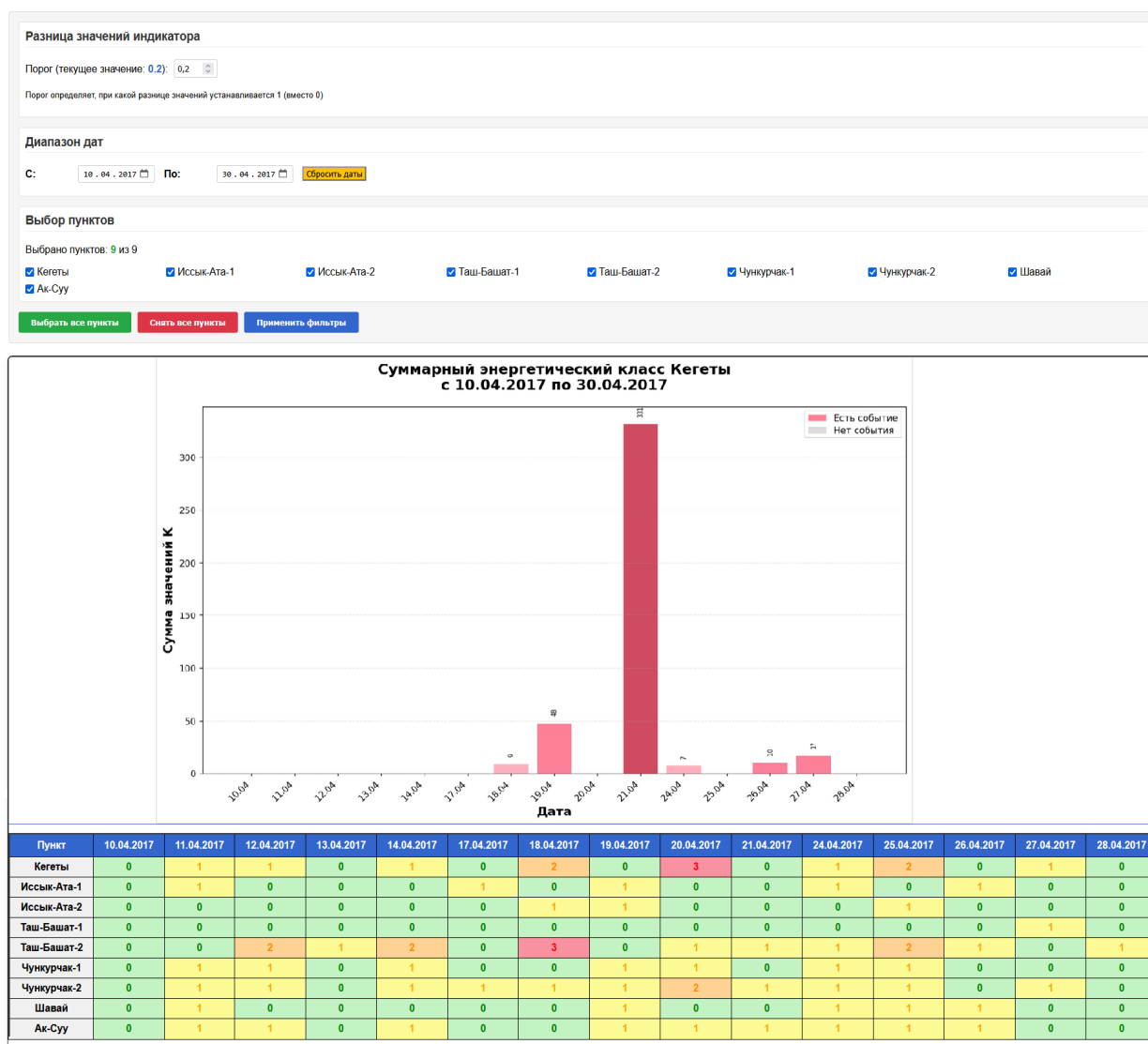


Рис. 2. Внешний вид программного инструментария

Обсуждение

С помощью разработанного инструментария можно выбрать период, пункты и посмотреть число срабатываний индикаторов предполагаемого землетрясения. В апреле данные электромагнитного мониторинга были зафиксированы всего 19 дней на всех точках БГП. Из 171 дня по всем пунктам, 89 дней индикаторы не сработали, 73 – сработал один индикатор, 7 – два индикатора, и 2 дня – три индикатора. Одновременное срабатывание трех индикаторов зафиксировано 20 апреля перед Кегетинским событием, а также 18 апреля на точке Таш-Башат-2, где было локальное умеренное землетрясение.

На ближайшем пункте к Кегеты Иссyk-Ата, индикаторы не сработали, хоть пункт и является ближайшим к эпицентру Кегетинского землетрясения, возможно, из-за удаления на 20 км и особенностей геологического строения разреза.

Анализ данных за 2017 год позволяют выявить причины отклонений на аномальных графиках: магнитные бури, грозы и сейсмическая активность. Таблица показывает закономерность: чаще всего проявляется одиночное срабатывание, тогда как тройные – редкие. Например, в январе из 171 дня лишь в 75 была зафиксирована активность, при этом 71 день срабатывал только один индикатор, два – 4 раза, три – ни одного раза.

По полученной таблице можно отличить локальные и глобальные события: если аномалия фиксируется на большинстве пунктов, то она характерна для магнитной бури; если на одном или двух, то это локальное событие. В качестве примера можно привести грозу 14 марта, когда аномальный сигнал поступил с одной точки наблюдений.

Особый интерес и внимание представляют одновременные срабатывания трёх индикаторов. В 2017 году это совпало с сильной сейсмической активностью, например 20 апреля перед Кегетинским толчком энергетическим классом выше 5. Срабатывание трех индикаторов одновременно связано с землетрясениями, двух или одного с другими причинами или мелкими событиями (класс ниже 5).

Так же срабатывание индикаторов в таблице на пункте наблюдения может зависеть от ориентации диполя. Они располагаются в противоположные стороны света, и получается так, что на одной стороне индикаторы сработали, а на другой – нет. Исследования в этой области еще ведутся и будут представлены подробнее в будущем.

Заключение

Были проанализированы данные электромагнитного мониторинга с пункта Кегеты на БГП за 2017 год. Выделены нормальные и аномальные данные электромагнитного мониторинга, рассмотрены причины возникновения аномалий, вычислены значения индикаторов сейсмических событий для всех пунктов наблюдения БГП. Создан программный инструментарий для автоматизированного расчета индикаторов. Он позволяет автоматизировать обработку данных электромагнитного мониторинга, свести рассчитанные показатели в единую таблицу и значительно сократить временные затраты. С его помощью можно выбрать временной период и пункты наблюдения, чтобы посмотреть, как срабатывали индикаторы на пунктах, располагающихся на территории БГП. Можно выделить дни, когда индикаторы срабатывают на большинстве пунктов одновременно, а также локальные события. Разработанный инструментарий повышает оперативность анализа и может быть применен в комплексных системах мониторинга сейсмогенерирующих зон.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективам ИВМиМГ СО РАН в Новосибирске и НС РАН в г. Бишкеке за совместную работу. Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0004. Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции РАН (тема № 1025032800066-3-1.5.1

«Комплексное исследование геофизических полей и неупругих процессов в сейсмо-активных зонах литосферы Северного Тянь-Шаня для мониторинга и прогноза сейсмической активности»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баталева Е. А., Мухамадеева В. А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // Геодинамика и тектонофизика. – 2018–Т. 9. – № 2.– С. 461–487.
2. Добровольский И. П. О проблеме прогноза тектонического землетрясения // Геофизические исследования. – 2010– Т. 11. – № 1.– С. 35–46.
3. Дыминский И. И., Смоленский И. В., Имашев С. А., Евменова Д. М. Цифровая платформа для анализа данных геоэлектромагнитного мониторинга: сб. материалов XX междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО–Сибирь–24» // Изд-во СГУГиТ. – 2024.– Т. 6. – С. 56–61.
4. Дашевский Ю. А., Ельцов И. Н., Рыбин А. К. Метод прогнозирования приближающегося сейсмического события на территории Бишкекского прогностического полигона // Свидетельство о государственной регистрации патента на изобретение № 2837367 от 31.03.2025.
5. Евменова Д. М., Дашевский Ю. А., Ельцов И. Н., Рыбин А. К., Имашев С. А. Признаки готовящегося сейсмического события на территории Бишкекского прогностического полигона по данным электромагнитного мониторинга методом становления поля // Геодинамика и тектонофизика. – 2025.– Т. 16. – С. 1–12.
6. Дашевский Ю. А., Евменова Д. М., Дыминский И. И., Смоленский И. В., Имашев С. А., Якименко А. А., Ельцов И. Н., Маринин И. В. Многопользовательская платформа для обработки и анализа электромагнитных зондирований и сейсмологических наблюдений –ПЛЭС: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 202561451 от 24.02.2025.
7. Васильев П. А. Web-программирование на языке Python. Фреймворки Django, Flask // Наука, техника, образование. – 2016. – С. 38–39.
8. Волобуев Н. Г. Сравнение web-фреймворков Python // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. – 2017. – Т. 4. – С. 44–46.

© Э. Н. Шорина, Д. М. Евменова, И. Н. Ельцов, С. А. Имашев, А. А. Якименко, 2026

Д. А. Шульгин^{1✉}, А. А. Якименко^{1,2}

Цифровая платформа для обработки и анализа геоэлектромагнитных данных мониторинга

¹Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: shulgin.daniil2003@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена цифровая платформа, предназначенная для комплексной работы с данными геоэлектромагнитного мониторинга. Платформа обеспечивает централизованное хранение, автоматизированный расчёт геофизических индикаторов (вольт-временная характеристика, время прихода максимума, среднесуточный размах сигнала), интерактивную визуализацию временных рядов, фильтрацию данных по пространственно-временным критериям и сопоставление с каталогами сейсмических событий.

Ключевые слова: цифровая платформа, геоэлектромагнитный мониторинг, сейсмическая активность, временные ряды, визуализация данных

D. A. Shulgin^{1✉}, A. A. Yakimenko^{1,2}

Digital platform for processing and analysis of geoelectromagnetic monitoring data

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: shulgin.daniil2003@yandex.ru

Abstract. The article presents a digital platform designed for comprehensive work with geoelectromagnetic monitoring data. The platform provides centralized storage, automated calculation of geophysical indicators (volt-time characteristic, time of maximum arrival, daily signal range), interactive visualization of time series, spatiotemporal filtering of data, and comparison with seismic event catalogs.

Keywords: digital platform, geoelectromagnetic monitoring, seismic activity, time series, data visualization

Введение

В современных геофизических исследованиях объёмы собираемых данных непрерывно растут. Особенно остро эта проблема стоит в задачах сейсмологического мониторинга, где своевременная обработка и интерпретация сигналов имеет критическое значение. Одним из информативных, но сложных для анализа источников являются данные электромагнитного мониторинга, которые могут нести информацию о подготовке сейсмических событий.

На территории Бишкекского геодинимического полигона в течение многих лет накапливались данные измерений кажущегося электромагнитного сопротивления (КЭМС) и сейсмической активности. Однако отсутствие специализированной цифровой инфраструктуры не позволяло проводить систематический автоматизированный анализ, выявлять скрытые закономерности и оперативно сопоставлять электромагнитные аномалии с сейсмологическими каталогами.

Существующие мировые решения (спутниковые миссии DEMETER, CSES, наземные системы VAN/SES), как правило, ориентированы на корпоративное или универсальное применение и обладают рядом ограничений: низкая автоматизация расчёта специализированных индикаторов, зависимость от ручной экспертной интерпретации, закрытость исходных данных и отсутствие гибких инструментов для интеграции с другими аналитическими системами.

Функциональные возможности платформы

Цифровая платформа представляет собой специализированный программный комплекс, обеспечивающий полный цикл работы с данными геоэлектромагнитного мониторинга. В основе её функциональности лежит централизованное хранилище, организованное по иерархическому принципу с разделением по пунктам наблюдения, годам и типам сигналов. Хранение данных в столбцовом формате Parquet с компрессией gzip обеспечивает высокую скорость чтения и эффективное сжатие больших объёмов информации, что особенно важно при работе с многолетними временными рядами измерений кажущегося электрического сопротивления. Такая архитектура хранения позволяет автоматизировать процессы поиска, фильтрации и загрузки данных без использования полноценной системы управления базами данных на начальных этапах эксплуатации, упрощая развёртывание и сопровождение платформы.

Платформа реализует автоматизированный расчёт специализированных геофизических индикаторов, предназначенных для количественной оценки состояния геоэлектрической среды. Исходные сигналы, регистрируемые с дискретностью 44 отсчёта на один эксперимент, предварительно подвергаются кубической сплайн-интерполяции, что позволяет повысить временное разрешение до 2000 отсчётов и, как следствие, повысить точность определения характеристик сигнала. Предусмотрена возможность представления индикаторов как в абсолютных единицах измерения, так и в нормированном виде для обеспечения сопоставимости при совместной визуализации разнородных показателей.

Фильтрация данных является одной из ключевых функций платформы, обеспечивающей возможность селективного анализа информации в зависимости от решаемых исследовательских задач. Пользователь имеет возможность отбирать данные по конкретному пункту наблюдения, задавать произвольный временной интервал в пределах всего доступного периода мониторинга, выбирать один или несколько индикаторов для расчёта и последующего отображения. В отношении сейсмических событий платформа поддерживает фильтрацию по диапазону энергетического класса, по расстоянию от выбранной станции мониторинга, а также по удалённости от центра заданной географической области.

Все параметры фильтрации задаются через графический интерфейс (рис. 1) и обрабатываются в синхронном режиме, обеспечивая оперативное получение релевантной выборки.

Пункт наблюдения

Пункт наблюдения

Кегеты

Временной диапазон

01/04/2022 → 30/05/2022

Каталог сейсмических событий

Каталог

KNET

Радиус вокруг пункта (км) 47

Энергетический класс землетрясения

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Метрики

- ☒ Время прихода максимума
- ☒ Вольт-временная характеристика
- ☒ Средний доверительный интервал
- ☒ Индикатор сейсмического события
- ☒ Нормировка метрик

Рис. 1. Параметры фильтрации платформы

Визуализационный модуль платформы реализует интерактивное графическое представление результатов анализа. На единой временной сетке отображаются временные ряды рассчитанных индикаторов и маркеры зарегистрированных сейсмических событий, как показано на рисунке 2. Каждое сейсмическое событие визуализируется с учётом его энергетического класса, что позволяет исследователю проводить качественное сопоставление аномальных изменений электромагнитного поля с произошедшими землетрясениями. Графическая подсистема поддерживает масштабирование фрагментов временной оси, выборочное отключение отдельных временных рядов через элементы легенды и отображение точных численных значений при наведении курсора. Такая визуальная аналитика способствует оперативному выявлению временных совпадений между пиковыми значениями индикаторов и датами сейсмических событий, что служит основой для формулировки и предварительной проверки гипотез о предвестниковых закономерностях.

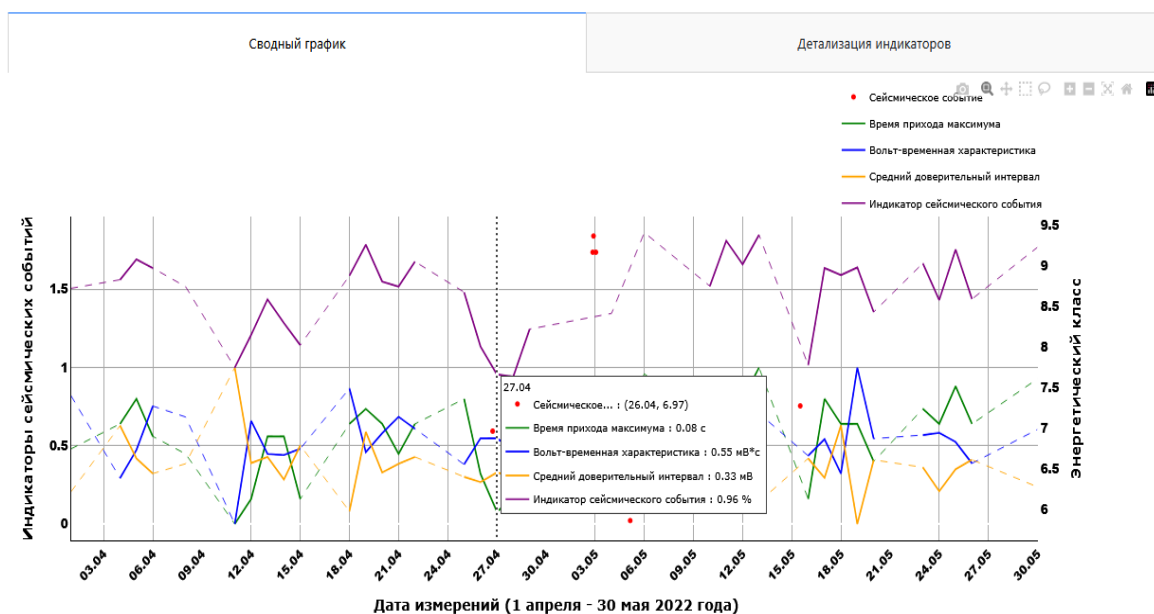


Рис. 2. Отображение результатов визуализации индикаторов и сейсмических событий на единой временной сетке

Для обеспечения интеграции с внешними аналитическими системами платформа предоставляет программный интерфейс, реализованный в архитектурном стиле REST. Посредством данного интерфейса внешние приложения могут выполнять программный запрос списка доступных станций наблюдения, перечня рассчитываемых индикаторов, значений индикаторов за заданный временной интервал, отфильтрованных сейсмических событий, а также исходных необработанных временных рядов. Все ответы API возвращаются в формате JSON, что гарантирует совместимость с большинством современных языков программирования и аналитических платформ. Наличие программного интерфейса позволяет встраивать платформу в сложные аналитические конвейеры и использовать её в качестве источника данных для внешних вычислительных модулей.

Платформа также поддерживает экспорт данных в табличных форматах CSV и XLSX (рис. 3). Исследователь может выгрузить как рассчитанные индикаторы — например, для последующего статистического анализа в специализированных пакетах, — так и исходные измерения. Экспорт осуществляется непосредственно из графического интерфейса, а полученные файлы могут быть открыты в широком спектре офисных и научных приложений, что расширяет функциональные возможности платформы за пределы встроенных инструментов визуализации и анализа.

Дата	ВВХ	ВГМ	СДИ	ИНХ
01.04.2022	0.8212003897360621	0.4799999999999998	0.20530629074851198	1.5065066804845708
04.04.2022	0.29314814238312176	0.6400000000000001	0.628572733180893	1.5617208755640157
05.04.2022	0.47342205691778244	0.8	0.4183879715082126	1.6918100284259951
06.04.2022	0.7539171759178269	0.5599999999999998	0.3223083715846583	1.6362255475024843
08.04.2022	0.6841559957941623	0.44800000000000023	0.3852640833300485	1.5174200791242112
11.04.2022	0	0	1	1
12.04.2022	0.6593125376959865	0.15999999999999982	0.38934683028108075	1.208659367977066
13.04.2022	0.44800972988893295	0.5599999999999998	0.4282961186916792	1.436305848580611
14.04.2022	0.44096944576766395	0.5599999999999998	0.2837428101663942	1.284712255934057
15.04.2022	0.48099371348459985	0.15999999999999982	0.5025069500920698	1.1435006635766687
18.04.2022	0.8667094467034807	0.6400000000000001	0.0809056224543056	1.5876150691577875
19.04.2022	0.45985458483139746	0.73600000000000015	0.5891954933582838	1.7850500781896828
20.04.2022	0.5808347327421476	0.6400000000000001	0.32908949732181786	1.5499242300639664
21.04.2022	0.6854558164845075	0.44800000000000023	0.38437133742124924	1.517827153905757
22.04.2022	0.6088421887673165	0.6400000000000001	0.4284979977587897	1.6773401860211068

Рис. 3. Интерфейс экспорта данных в табличных форматах

Заключение

В рамках проведённой работы введена в эксплуатацию цифровая платформа для обработки и анализа данных геоэлектромагнитного мониторинга. Платформа обеспечивает централизованное хранение многолетних массивов данных, автоматизированный расчёт специализированных геофизических индикаторов (вольт-временной характеристики, времени прихода максимума и среднесуточного размаха сигнала), гибкую фильтрацию информации по пространственно-временным критериям и энергетическим классам сейсмических событий, а также интерактивную визуализацию временных рядов совместно с маркерами землетрясений.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Бишкекского геологического института при ИС РАН и ИВМиМГ СО РАН за предоставленные данные, ценные консультации и содействие во внедрении платформы.

© Д. А. Шульгин, А. А. Якименко, 2026

С. А. Тесленок^{1,2}✉, Э. А. Лебедев¹, Е. И. Колесникова¹, А. А. Скурихин¹

Исследования изменений ландшафтной структуры нефтегазового региона (на примере Ханты-Мансийского автономного округа – Югры)

¹Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск,
Российская Федерация

²Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва, г. Саранск,
Российская Федерация
e-mail: s_teslenok@ugrasu.ru

Аннотация. Цель исследований – ретроспективный анализ изменений ландшафтной структуры территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры – ключевого нефтегазодобывающего региона России. Исследование выполнено на разных территориальных уровнях – всего округа, репрезентативных ключевых участков в районах активной нефтегазодобычи и лесоразработок, сопровождающихся интенсивным инфраструктурным строительством и особо охраняемой природной территории регионального значения – природного парка «Самаровский чугас». Проанализированы факторы прямого и опосредованного антропогенного воздействия на природные комплексы, выявлены и оценены особенности динамика ландшафтов в условиях территорий разной степени антропогенной преобразованности и разных режимов охраны. Выяснено, что перестройка ландшафтной структуры детерминирована совместным действием прямого изъятия земель для нефтегазовой инфраструктуры и косвенного гидрологического прессинга, с потерей лесных геосистем и развитием заболоченных территорий и аквальных комплексов. Появление и развитие транспортной инфраструктуры запускает цепочку вторичных процессов: охотничье и рекреационное природопользование, создание условий для незаконной вырубki лесов, несанкционированного складирования отходов и иной противоправной деятельности. Вдоль транспортных коридоров наблюдаются процессы фрагментации лесных массивов, нарушающие целостность экосистем, затрудняющие миграции диких животных, способствующие инвазии чужеродных биологических видов. Результаты исследования подчеркивают важность и необходимость экологического мониторинга для сохранения уникальных геокомплексов разных уровней в условиях растущего влияния внешних факторов. Хотя устойчивость ландшафтов Югры в целом характеризуется высокой способностью к самовосстановлению, предельно допустимые нагрузки в ряде районов близки к пороговым значениям и даже превышают их из-за постоянного техногенного давления со стороны инфраструктурных узлов нефтегазодобывающей промышленности. Главные факторы риска определяют необходимость внедрения принципов ландшафтного планирования и формирование системы устойчивого и сбалансированного рекреационного природопользования на основе комплексного геоинформационно-картографического анализа, широко использования данных дистанционного зондирования и глобального позиционирования, возможностей нейросетей и искусственного интеллекта.

Ключевые слова: ландшафтная структура, нефтегазодобывающий регион, антропогенная трансформация, экологический мониторинг, природный парк «Самаровский чугас», Ханты-Мансийский автономный округ – Югра

**Research on changes in the landscape structure
of the oil and gas region
(using the example of the Khanty-Mansiysk Autonomous
Okrug – Yugra)**

¹Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

²Mordovian State University named after N. P. Ogarev, Saransk, Russian Federation
e-mail: s_teslenok@ugrasu.ru

Abstract. The purpose of the research is to conduct a retrospective analysis of changes in the landscape structure of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra, a key oil and gas producing region in Russia. The study was conducted at various territorial levels, including the entire region, representative key areas in areas of active oil and gas production and logging, which are accompanied by intensive infrastructure construction, and a protected natural area of regional significance, the Samarovsky Chugas Nature Park. The factors of direct and indirect anthropogenic impact on natural complexes have been analyzed, and the features of landscape dynamics in areas with different degrees of anthropogenic transformation and different protection regimes have been identified and evaluated. It has been found that the restructuring of the landscape structure is determined by the combined effect of direct land acquisition for oil and gas infrastructure and indirect hydrological pressure, with the loss of forest geosystems and the development of wetlands and aquatic complexes. The emergence and development of transport infrastructure triggers a chain of secondary processes: hunting and recreational use of natural resources, the creation of conditions for illegal logging, unauthorized waste disposal, and other illegal activities. Along transport corridors, there are processes of fragmentation of forest areas, which disrupt the integrity of ecosystems, hinder the migration of wild animals, and contribute to the invasion of alien biological species. The results of this study highlight the importance and necessity of environmental monitoring to preserve unique geocomplexes at various levels in the face of increasing external influences. Although the stability of Yugra landscapes is generally characterized by a high capacity for self-recovery, the maximum permissible loads in some areas are close to or even exceed the threshold values due to the constant anthropogenic pressure from the infrastructure nodes of the oil and gas industry. The main risk factors determine the need to implement landscape planning principles and create a system of sustainable and balanced recreational environmental management based on comprehensive geoinformation and cartographic analysis, extensive use of remote sensing and global positioning data, and the capabilities of neural networks and artificial intelligence.

Keywords: landscape structure, oil and gas producing region, anthropogenic transformation, environmental monitoring, Samarovsky Chugas Nature Park, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra

Введение

Территория Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО – Югры, Югры), ключевого нефтегазодобывающего региона России, демонстрирует сложное переплетение интенсивного промышленного освоения и доминирования зональных лесо-болотных комплексов южной, средней и северной тайги [1–3]. Развитие линейной и площадной инфраструктуры нефтегазодобычи (подъездных автодорог, коридоров трубопроводов и линий электропередачи, кустовых площадок для размещения буровых установок, шламовых амбаров, карьеров, полигонов для размещения отходов, зон нефтеразливов) не только приводят

к нарушению структуры растительного покрова и его уничтожению; загрязнению, уплотнению и разрушению почв; изменению гидрологического режима водных объектов [2–4]. Оно выступает катализатором пространственной перестройки природных комплексов, провоцируя перераспределение площадей базовых типов геосистем, системные нарушения гидрологического баланса и нарастающую ландшафтную фрагментацию территории [3].

При этом важнейшим компонентом природной среды региона, играющим ключевую роль в поддержании его биоразнообразия, регулировании гидрологического режима и стабилизации климатических условий, являются именно лесные ландшафты. В условиях интенсивного природопользования и расширения хозяйственной деятельности возрастает значимость необходимости изучения и оценки антропогенных воздействий, оказываемых на лесные геосистемы [5]. Они находятся под воздействием целого комплекса антропогенных факторов, связанных с промышленной деятельностью, инфраструктурным развитием, урбанизацией, пожарами, рекреацией. Характер этих воздействий как точечный, так и смешанный, оказывается и прямое, и опосредованное влияние на их структурно-функциональные особенности. Понятно, что наиболее важным источником антропогенного воздействия на ландшафты региона выступает нефтегазодобыча. Второй по значимости является лесозаготовительная деятельность. Причем, если первым двум факторам посвящено большое количество исследований [2–5 и др.], то зачастую неосвещенным остается фактор влияния на ландшафты транспортной инфраструктуры, являющейся следствием развития промышленности округа.

Методы и материалы

Методической основой исследования динамики ландшафтной структуры стал геоинформационно-картографический анализ и сопоставление двух временных срезов: ландшафтной карты начала 2000-х годов [1] и 2015 г., сформированной на базе данных дистанционного зондирования и региональных геоинформационных ресурсов [3]. Геообработка в ГИС-среде [6] позволила выявить и отследить природно-антропогенную динамику лесных, болотных, водных и техногенно трансформированных геосистем региона.

Анализ пространственного распределения нагрузки, оказываемой на ландшафты региона дорожной сетью, осуществлялся на основе соответствующей разработанной карты. Методом экспертной оценки определялись показатели антропогенной нагрузки на разном расстоянии от дорожного полотна с последующим определением значения нагрузки в зависимости от степени удаленности от дорог для всей территории региона.

Изучение изменений ландшафтной структуры на территории природного парка (ПП) «Самаровский чугас», как важнейшего элемента экологического каркаса г. Ханты-Мансийска [7], включало изучение и анализ литературных [7–14] и интернет-источников [15] и фондовых материалов [16], полевые исследования и их камеральную обработку. Важными этапами явились полевое и геоинформационное картографирование в рамках разработки проекта «Геологические

процессы на территории ПП «Самаровский чугас» (с созданием соответствующей интерактивной карты), а также создание интерактивной цифровой туристско-рекреационной карты парка.

Результаты и обсуждение

Выявленная перестройка структуры и соотношения геокомплексов региона носит масштабный характер: лесные равнинные комплексы потеряли в площади с начала 2000 гг. 941 455 га (–23,1 %), сократившись с 4 085 491 до 3 144 036 га, тогда как болотные равнинные геосистемы, напротив, прибавили 367 962 га (+14,9 %, до 2 837 788 га). Но наиболее интенсивный рост зафиксирован у водных комплексов – с 137 169 до 725 372 га (+588 203 га) [3]. В структурном плане это означает смещение доминирования от лесных (снижение доли с ~60 до ~47 %) к переувлажненным комплексам и открытым акваториям (рост доли болотных геосистем с ~36 до ~42 %, аквальных – с ~2 до ~11 %). Полученные данные были положены в основу проведения сравнительного анализа эффективности углерод-регулирующей функции болот и бореальных лесов средней тайги Западной Сибири в пределах территории Югры [3]. Несмотря на относительно скромную абсолютную площадь техногенных комплексов, их экологическая значимость непропорционально высока: это узлы полной трансформации, формирующие инфраструктурный каркас, который инициирует каскадные изменения не только вмещающих, но и прилегающих ландшафтов, независимо от их территориальных уровня – всего округа, репрезентативных ключевых участков в районах активной нефтегазодобычи и лесоразработок, с учетом полимасштабной организация ландшафтов [17]. Происходящая при этом фрагментация природных ландшафтов проявляется в сокращении крупных лесных контуров, увеличении числа изолированных участков, росте протяженности экотонов и доли переходных зон, что ведет к разрыву экологических связей, изменениям микроклимата и снижению резистентности геосистем, подтверждая, что трансформация носит не только площадной, но и глубинно-структурный характер.

Вторым, после нефтегазодобычи, важным фактором антропогенного воздействия является лесозаготовительная деятельность. В ряде случаев имеют место случаи превышения допустимых норм изъятия древесины, приводящие к деградации лесных экосистем. Нарушение целостности и связности лесных ландшафтов, упрощение их породного состава, утрата подлеска и лесной подстилки способствуют снижению устойчивости экосистем и делают их более уязвимыми к биотическим и абиотическим стрессорам, включая насекомых-вредителей, болезни и лесные пожары.

Следствием развития промышленности округа является влияние на ландшафты транспортной инфраструктуры, которое можно разделить на прямое (непосредственное изменение естественных ландшафтов в ходе строительства дорог) и косвенное (роль дорожной сети как каркаса и проводника для иных видов антропогенной нагрузки).

По результатам оценки степени влияния и пространственной распределенности прямой нагрузки дорожной сети была проанализирована общая протяженность

основного типа дорог на территории округа – автомобильных дорог общего пользования. Общая их длина в Югре составляет около 7,4 тыс. км, включая: федерального значения – более 0,4 тыс. км, регионального и межмуниципального – около 2,9 тыс., местного – более 4,0 тыс. км [18]. Для построения карты антропогенной нагрузки на ландшафты на разном расстоянии от дорожного полотна методом экспертной оценки были определены соответствующие значения, площадь региона разделена на полигоны гексагональной формы с длиной стороны 12,5 км и для каждого из них определено значение нагрузки в зависимости от удаленности от дорог. Анализ полученной карты позволил сделать выводы о том, что наибольшая показатели отмечаются в центральной части округа и имеет выраженную тенденцию развития в направлении с запада на восток (стык Советского и Кондинского районов, Нефтеюганского и севера Сургутского, как следствие активного освоения площадей лицензионных участков компаниями-недропользователями), а наименьшая – на территориях с малым количеством или отсутствием средних и крупных населенных пунктов (север Березовского района, весь Белоярский, юг Сургутского и восточная часть Нижневартовского). В разрезе же муниципальных образований был проведен и расчет показателей абсолютной и относительной площади, занятой территориями с разным уровнем и интенсивностью антропогенной нагрузки в зоне влияния дорожной сети.

В контексте антропогенного преобразования и трансформации ландшафтной структуры региона особое значение приобретают особо охраняемые природные территории, расположенные вблизи зон промышленной активности. Характерным примером является природный парк (ПП) «Самаровский чугас» – уникальный полигон для изучения влияния нефтегазового комплекса на геосистемы региона. На его территории широко развиты экзогенные геологические процессы, такие как водная эрозия, оползне- и оврагообразование, солифлюкция, с развитием многочисленных оползней и оплывин, заболачивание, образование наледей, суффозионно-просадочные явления, осыпание откосов [9, 10, 16], многие из которых стимулированы различными видами антропогенной деятельности. Прежде всего это масштабная застройка склонов, сооружение и прокладка коммуникаций, различных трасс, дорог и дорожек. Все это сопровождается нарушением и уничтожением травянистого и почвенного покрова, сплошной вырубкой лесной древесной и кустарниковой растительности, преобразованиями естественного гидрологического режима ландшафтов (чаще – подпруживанием русел малых водотоков), созданием условия для концентрации стока в специфической естественной ландшафтной среде со значительной (25° и более) крутизной и расчлененностью склонов оврагами, лощинами и балками, преобладающим легким (супесчаным и суглинистым) механическим составом почв, часто илистых, плывунных, легко подвергающихся воздействию процессов смыва, размыва и суффозионного выноса материала. Вместе с тем, в техногенно-измененных урочищах и экотопах могут создавать микроклиматические и гидрологические условия, благоприятствующие росту и развитию некоторых видов растений (редких орхидных) [11, 12].

Анализ особенностей пространственно-временной структуры лесных геосистем на территории ПП (по данным постоянных пробных площадей 1979–1983

гг. и повторному учёту в 2004 г.) [8] выявил изменения породного состава (с количества ели и уменьшением количества березы, увеличением значений средних диаметров с 24,0 до 25,3 см, значений средних высот с 20,0 до 25,2 м и запаса древесины с 385 до 494 м³/га. Отмечена необходимость решения задачи картографирования динамики продуктивности (орехоплодности) кедровых лесонасаждений [8] и динамики рекреационной нагрузки на ландшафты ПП и их компоненты в условиях развития экологического и научно-познавательного туризма [13, 15]. Значимость такого рода исследований в геоэкологических оценках территории округа была определена нами ранее [5].

Заключение

Выявленная фрагментация природных массивов проявляется в сокращении крупных лесных контуров, увеличении числа изолированных участков, росте протяженности экотонов и доли переходных зон, что ведет к разрыву экологических связей, модификации микроклимата и снижению резистентности геосистем, подтверждая, что трансформация носит не только площадной, но и глубинно-структурный характер. Интегральный анализ свидетельствует, что перестройка ландшафтной структуры Югры детерминирована сопряжением прямого изъятия земель под нефтегазовую инфраструктуру и косвенного гидрологического прессинга, главными последствиями которого стали потеря почти 1 млн га лесных геосистем, экспансия заболоченных территорий и более чем пятикратный рост площади водных объектов. Геоинформационно-картографический сравнительный ретроспективный анализ разновременных данных, таким образом, решает двойную задачу: выявляет векторы антропогенной деградации и дает их количественную меру, позволяя использовать динамику ландшафтной структуры как интегральный индикатор состояния среды в системе геоэкологического мониторинга нефтегазовых регионов для научно обоснованного планирования природоохранных и восстановительных мероприятий.

Важное влияние на ландшафты Югры оказывает дорожная сеть, причем не только прямое, но и косвенное. Ее наличие запускает цепочку вторичных процессов: охотничье и рекреационное использование, распространение неучтенных проездов и съездов с целью незаконной вырубki лесов, несанкционированного складирования отходов и иных противозаконных видов деятельности. Вдоль транспортных коридоров наблюдаются процессы фрагментации лесных массивов с нарушением связности геосистем, что затрудняет миграции диких животных, нарушает целостность экосистем и способствует инвазии чужеродных видов биоты (например, борщевика Сосновского). В контексте уникального гидрологического режима геосистем ХМАО – Югры важно упомянуть и о влиянии дорожной сети на естественный сток и терморегим почв – в условиях многолетнемерзлых и сезонно промерзающих пород каждая дорога представляет собой искусственный водораздел, что инициирует локальные процессы осушения или заболачивания.

Результаты исследования подчеркивают важность и необходимость постоянного экологического мониторинга для сохранения уникальных природных

комплексов как регионального, так и локального уровней в условиях растущего влияния внешних факторов.

Устойчивость природных комплексов ПП «Самаровский чугас» и округа в целом характеризуется высокой способностью к самовосстановлению благодаря значительной доле хвойных лесов (включая наиболее ценные кедровники). Тем не менее, предельно допустимые нагрузки близки к пороговым значениям из-за постоянного техногенного давления со стороны расположенных на незначительном удалении инфраструктурных узлов нефтегазодобывающей промышленности. Главный фактор риска здесь – не только прямое освоение, но и кумулятивный эффект (накопленное воздействие всех антропогенных факторов). Это определяет необходимость пересмотра размеров охранных зон, внедрения принципов ландшафтного планирования и формирование системы устойчивого и сбалансированного рекреационного природопользования [19, 20] на основе комплексного геоинформационно-картографического анализа, широко использования данных систем дистанционного зондирования и глобального позиционирования, возможностей нейросетей и искусственного интеллекта [14].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Москвина Н. Н. Ландшафтный анализ территории Ханты-Мансийского автономного округа для обеспечения рационального природопользования: дис. ... канд. геогр. наук. – Тюмень, 2004. – 208 с.
2. Соромотин А. В. Воздействие добычи нефти на таежные экосистемы Западной Сибири. – Тюмень : Тюменский гос. ун-т, 2010. – 320 с.
3. Лебедев Э.А., Ахмедова И.Д., Тесленок С.А. Сравнительная эффективность углерод-регулирующей функции болот и бореальных лесов средней тайги Западной Сибири // Экология и промышленность России, 2025. – Т. 30. – № 4. – С. 57–61. DOI: 10.18412/1816-0395-2026-4-57-61.
4. Соромотин А. В. Техногенная трансформация природных экосистем таежной зоны в процессе нефтегазодобычи (на примере Тюменской области): автореф. дис. ... док. биол. наук. – Тюмень, 2007. – 47 с.
5. Тесленок С. А., Скурихин А. А. Картографические материалы в работах по геоэкологической оценке территории // Региональные геосистемы, 2024. – № 48 (3). – С. 416–426. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-3-416-426.
6. Тесленок К. С. Создание геоинформационного проекта и его использование в целях развития хозяйственных систем. Геоинформационное картографирование в регионах России: материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. (Воронеж, 10–12 дек. 2015 г.). – Воронеж : Научная книга, 2015. – С. 134–138.
7. Ивановская Д. Б. Природный парк «Самаровский чугас» как элемент экологического каркаса города Ханты-Мансийска: функции, состояние: магистерская дисс. – Ханты-Мансийск, 2022. – 53 с.
8. Галако В. А., Залесов С. В., Павлов А. П. Динамика пространственно-временной структуры кедровых насаждений природного парка «Самаровский чугас» Ханты-Мансийского автономного округа // Леса Урала и хозяйство в них : сб. науч. тр. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т. – 2006. – № 27. – С. 268–276.
9. Большаник П. В. Антропогенная трансформация рельефа природного парка г. Ханты-Мансийска // Вестник Югорск. гос. ун-та, 2014. – № 3 (34). – С. 13–16
10. Большаник П. В. Особенности и происхождение рельефа природного парка «Самаровский чугас» / Сб. тезисов заочной конференции, посвященной 15-летию бюджетного

учреждения Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Природный парк «Самаровский чугас» 11-12 марта 2016 г. – Ханты-Мансийск, 2016. – С 10 – 18.

11. Bolshanik P.V., Kusnezova S.B., Karaseva D.D. Natural features of the orchid refugium on the territory of the natural park “Samarovsky chugas // Environmental Dynamics and Global Climate Change. – 2021. – Т. 12. – № 1. – С. 15-26.

12. Федосеева А. С. Редкие растения природного парка «Самаровский чугас» г. Ханты-Мансийска // Ratio et Natura, 2022. – № 2 (6). – 2 с.

13. Антюфеева Т. В., Бибикина Д. М., Кузнецова С. Б., Русских К. В., Скурихин А. А., Хамедов В. А. Развитие сети экологических троп в природном парке «Самаровский чугас» // Экологический туризм: современные векторы развития: коллективная монография. – Екатеринбург, 2022. – С. 371–377.

14. Колесникова Е. И., Тесленок С. А., Калашникова Л. Г., Лебедев Э. А. Опыт, возможности и перспективы космического зондирования в региональном геоэкологическом анализе и мониторинге динамики ландшафтной структуры и природопользования // Известия Дагестанск. гос. педагогич. ун-та. Естеств. и точ. науки. – 2025. – Т. 19. – № 4. – С. 62–73. DOI: 10.31161/1995-0675-2025-19-4-62-73.

15. Техногенная нагрузка // Особо охраняемые природные территории Югры [Электронный ресурс]. – 2026. – URL : <https://ugraoopt.admhmao.ru/samchugas/tekhnogennaya-nagruzka-samchugas/> (дата обращения : 18.05.2026 г.).

16. Кусковский В. С. Изучение антропогенного влияния на геологическое состояние ландшафтов природного парка «Самаровский чугас» (Ханты-Мансийские холмы) : отчет о научно-исследовательской работе. – Ханты-Мансийск : РИЦ ЮГУ, 2007. – 111 с.

17. Хорошев А. В. Полимасштабная организация ландшафтов Среднего Приобья // Окружающая среда и менеджмент природных ресурсов. Тезисы докладов III Международ. конф., г. Тюмень, 6–8 нояб. 2012 г. – Тюмень : Изд-во Тюмен. гос. ун-та, 2012. – С. 245–247.

18. Протяженность автодорог федерального значения, по регионам. Регионы – статистика с 2014 по 2025 годы [Электронный ресурс]. – 2026. – URL : <https://statbase.ru/datasets/national-statistics-of-russia/territory-and-infrastructure/length-of-federal-highways-by-region-national-stat/> (дата обращения : 18.05.2026 г.).

19. Тикунов В. С., Цапук Д. А. Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. – М., Смоленск: Изд-во СГУ, 1999. – 176 с.

20. Кочуров Б. И. Экодиагностика и сбалансированное развития. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 361 с.

© С. А. Тесленок, Э. А. Лебедев, Е. И. Колесникова, А. А. Скурихин, 2026

К. Н. Дубровин^{1✉}, Л. В. Илларионова¹, Е. А. Фомина¹

Усовершенствование системы мониторинга пахотных земель Хабаровского края с использованием спутниковых мультиспектральных данных

¹Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск, Российская Федерация
e-mail: nob_keeper_93@mail.ru

Аннотация. Осуществление мониторинга пахотных земель в Хабаровском крае является важнейшей задачей для развития региона. Использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса позволяет эффективно решать эту задачу. В данной работе в целях усовершенствования системы мониторинга предложено использовать значения временных рядов отражательной способности в инфракрасном спектре (каналы B5, B7, B11 спутников Sentinel-2) для разделения посевов кукурузы от посевов сои. При исследовании отражательной способности посевов в Хабаровском крае в 2025 году выявлено, что значения отражательной способности для посевов сои в первой половине июля и конце августа-начале сентября (для всех трех каналов) оказались значимо выше, чем у посевов кукурузы. Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы для построения эффективного классификатора, встроенного в общую систему мониторинга пахотных земель Хабаровского края.

Ключевые слова: сельскохозяйственный мониторинг, дистанционное зондирование Земли, машинное обучение, мультиспектральные данные

K. N. Dubrovin^{1✉}, L. V. Illarionova¹, E. A. Fomina¹

Improving the cropland monitoring system in Khabarovsk Krai using satellite multispectral data

¹Computing Center FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation
e-mail: nob_keeper_93@mail.ru

Abstract. Cropland monitoring in Khabarovsk Krai is a critical task for the region's development. Using remote sensing data allows for an effective solution. In this study, we propose using infrared reflectivity time series (B5, B7, and B11 bands of the Sentinel-2 satellites) to distinguish corn from soybean crops to improve the monitoring system. A study of crop reflectivity in Khabarovsk Krai in 2025 revealed that reflectivity values for soybean crops in the first half of July and late August-early September (for all three bands) were significantly higher than those for corn crops. These results can be further used to develop an effective classifier integrated into the cropland monitoring system of Khabarovsk Krai.

Keywords: agricultural monitoring, remote sensing, machine learning, multispectral data

Введение

Мониторинг земель сельскохозяйственного назначения представляет собой систему оперативных, периодических и базовых (исходных) наблюдений за изменением качественного и количественного состояния земель сельскохозяйственного назначения [1]. Важнейшей задачей является картографирование

пахотных земель – выявление посевов сельскохозяйственных культур (с оценкой их состояния), обнаружение неиспользуемых участков, постоянное ведение статистики по посевным площадям и площади неиспользуемой пашни. Для снижения затрат и повышения оперативности получения данных при решении задач сельскохозяйственного мониторинга активно применяются методы дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ) [2,3].

Ранее в Хабаровском Федеральном исследовательском центре ДВО РАН была предложена методика мониторинга пахотных земель, включающая в себя построение достоверных карт пахотных земель [4]. Разработанная схема картографирования включает в себя получение спутниковых данных и данных наземных наблюдений, расчет значений индекса NDVI, построение непрерывных временных рядов индекса NDVI, решение задачи классификации с использованием методов машинного обучения, построение карт-схем пахотных земель. Данная схема использовалась для распознавания посевов и неиспользуемой пашни, построения карт-схем в Хабаровском крае в 2021-2023 годах [5]. Общая точность классификации составила 96–97 %. Метод позволил достигнуть высокой достоверности картографирования посевов сои (98 %), зерновых культур (96–97 %), гречихи (94–96 %), многолетних трав (94 %), а также неиспользуемой пашни (94–99 %). В то же время возникли проблемы с точностью распознавания посевов кукурузы (65–75 %). Временные ряды NDVI для посевов сои и кукурузы имели схожий вид и, так как в структуре посевных площадей в Хабаровском крае соя является доминирующей культурой, большое количество временных рядов класса «кукуруза» попали в класс «соя». Подобные ошибки распознавания могут приводить к снижению достоверности картографирования, особенно в регионах со значительными посевными площадями кукурузы.

Разделение посевов сои и кукурузы ввиду схожести сроков сева и наступления фенологических фаз является непростой задачей. Применению спутниковых мультиспектральных данных для решения этой задачи посвящен ряд исследований. Анализ научных работ показал, что в большей части из них используются значения отражательной способности в красном крайнем (Red Edge) [6,7], ближнем инфракрасном (NIR) [8] и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазоне [9]. Результатом этих работ являются рекомендации по использованию конкретных каналов спутниковых снимков и периодов наблюдения.

Работа посвящена исследованию возможности применения значений отражательной способности в инфракрасных спектральных каналах для решения задачи разделения посевов кукурузы и сои. В рамках исследования производится анализ сезонного хода отражательной способности, выбор сочетаний диапазонов съемки и периодов наблюдения для решения поставленной задачи.

Методы и материалы

Областью исследования являлась южная часть Хабаровского края. На территории Хабаровского района и района имени Лазо в 2025 году с использованием ранее предложенной методики распознавания посевов с использованием данных ДЗЗ были определены поля с посевами сои и кукурузы. Для валидации информации и

разделения полей на два класса – «соя» и «кукуруза» использовались сведения о севообороте, полученные из системы ЕФГИС ЗСН [10], внесенные сельскохозяйственными производителями. Выборка включала в себя 295 полей с посевами сои (общей площадью 6290 га) и 20 полей с посевами кукурузы (общей площадью 571 га). Несбалансированность количества полей в классах вызвана крайней неравномерностью посевных площадей культур в регионе (согласно сведениям Росстата [11], посевы сои занимали 60 % пашни в Хабаровском крае, а посевы кукурузы только 4 %).

Для области исследования из спутникового архива ХФИЦ ДВО РАН были загружены 36 спутниковых снимков Sentinel-2 уровня обработки L2A в период с начала мая по конец октября 2025 г. С использованием авторского программного обеспечения были построены непрерывные временные ряды (с шагом 7 дней) отражательной способности в каналах B5 (Vegetation Red Edge, средняя длина волны 705 нм), B7 (Vegetation Red Edge, средняя длина волны 783 нм) и B11 (SWIR, средняя длина волны 1610 нм) с пространственным разрешением 20 метров на пиксель. Для восстановления непрерывности временных рядов (устранения влияния облачности) производилась интерполяция недостающих значений с применением кубических сплайнов. Для каждого полигона вычислялись средние значения для каждой недели. Для сравнения и выявления значимости различий между отражательными способностями посевов в классах «соя» и «кукуруза» применялся непараметрический критерий Манна-Уитни ($p=0,05$).

Результаты

На рисунках 1–3 приведены усредненные временные ряды отражательной способности в исследуемых диапазонах для посевов сои и кукурузы.

Оба временных ряда для канала B5 имеют несколько пиков (для посевов кукурузы частота колебаний выше). При этом в районе максимума вегетации (в августе, 212–240 дни) наблюдается снижение отражательной способности. Значимые различия выявлены в период с 191 по 205 день (вторая-третья декада июля), что соответствует фазе цветения, в это время отражательная способность сои значимо выше. Другим важным периодом для идентификации посевов, когда отражательная способность значимо выше, является первая-вторая декады сентября (247–261 дни) – период после созревания сои и время уборки кукурузы.

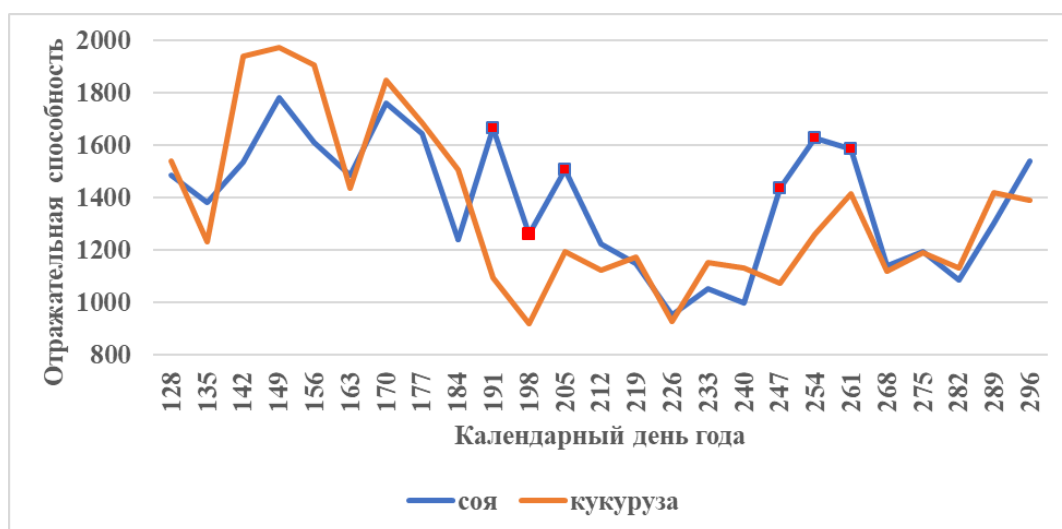


Рис. 1. Усредненные графики сезонного хода отражательной способности для посевов сои и кукурузы (канал В5), красными маркерами указаны значимо более высокие значения ($p < 0,05$).

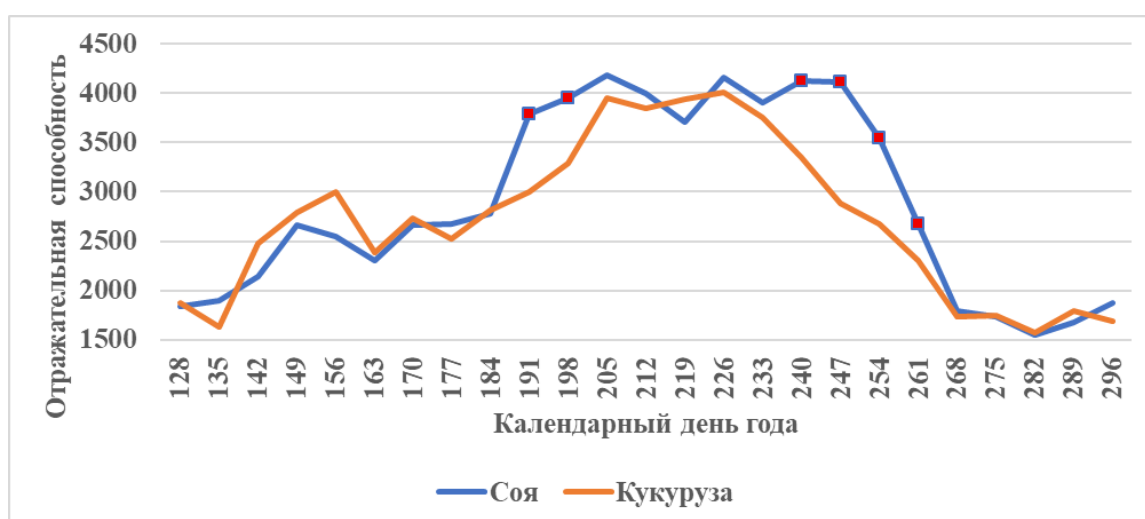


Рис. 2. Усредненные графики сезонного хода отражательной способности для посевов сои и кукурузы (канал В7), красными маркерами указаны значимо более высокие значения ($p < 0,05$).

Отражательная способность посевов в канале В7 растет к максимуму вегетации культур (до 4000 для посевов кукурузы и 4200 для посевов сои), а затем снижается после его прохождения. В период после уборки кукурузы и потери биомассы у сои отражательная способность снижается до 1500–1800. В период с 191 по 198 календарный день (первая декада июля) и с 240 по 261 день (конец августа–вторая декада сентября) отражательная способность посевов сои значимо выше (на 600–1200). Первый период соответствует фазе ветвления у сои и фазе 6-7 листьев у кукурузы. Вторым периодом приходится на время, в которое осуществляется уборка кукурузы.

Графики временных рядов для посевов сои и кукурузы в SWIR-диапазоне имеют схожие тенденции – отражательная способность достигает максимума уже в конце мая – начале июня (149-156 календарные дни), то есть в начале вегетативного роста посевов, второй максимум достигается во второй половине июня (170-179 день года). В период вегетативного роста происходит снижения отражательной способности, при этом графики идут практически параллельно. На протяжении июля и августа (с 184 по 247 день года) отражательная способность посевов сои (варьируется от 2181 до 2938) значительно выше по сравнению с посевами кукурузы (варьируется от 1941 до 2529).

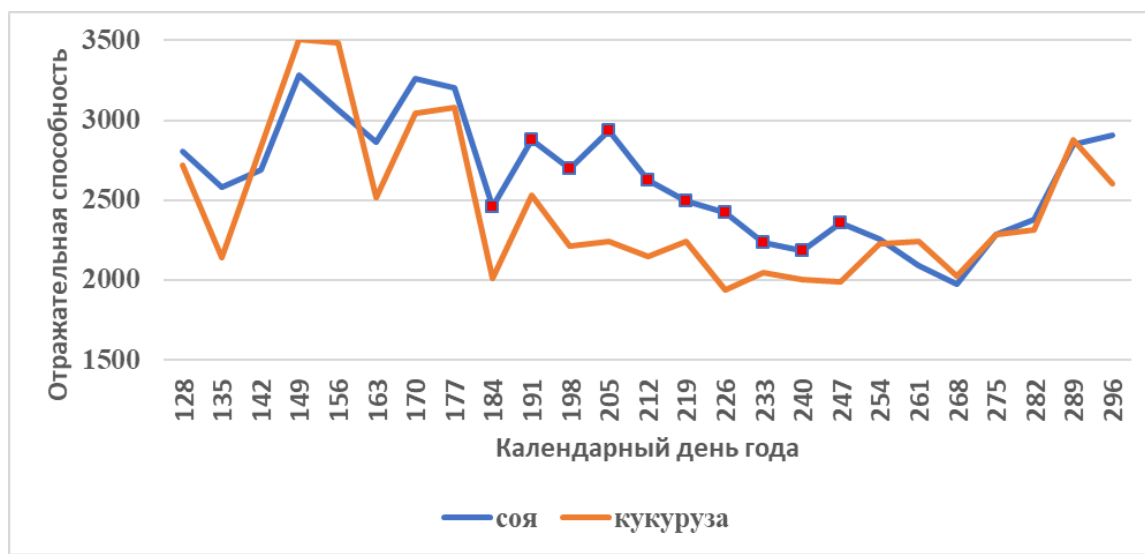


Рис. 3. Усредненные графики сезонного хода отражательной способности для посевов сои и кукурузы (канал B11), красными маркерами указаны значимо более высокие значения ($p < 0,05$).

Заключение

Использование данных дистанционного зондирования Земли и методов машинного обучения позволяет эффективно осуществлять мониторинг пахотных земель. Однако применения одного вегетационного индекса NDVI может быть недостаточно для четкой идентификации посевов некоторых сельскохозяйственных культур. Проведенный в 2025 году статистический анализ сезонного хода отражательной способности (в каналах B5, B7, B11 спутника Sentinel-2) участков с посевами сои и кукурузы в Хабаровском крае позволил выявить периоды наиболее подходящие периоды для распознавания этих культур. В первой половине июля (вегетативный рост, ветвление-начало цветения) и конец августа–начало сентября (после достижения зрелости и вегетативного роста) значения отражательной способности для посевов сои во всех трех каналах оказались значимо выше, чем у посевов кукурузы.

Полученные результаты могут использоваться для разработки дополнительного классификатора, разделяющего посевы сои от посевов кукурузы, встраиваемого в общую систему мониторинга пахотных земель Хабаровского края. В то же

время, в дальнейшем для проверки результатов исследования планируется проведение многолетних исследований для оценки межгодовой вариации отражательной способности, анализ других диапазонов и производных индексов.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 24-11-20030) и Правительства Хабаровского края (Соглашение № 106С/2024 от 31.07.2024).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об утверждении Порядка осуществления государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения: Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 24.12.2015 № 664: (с изм. на 19.06.2024) [Электронный ресурс] // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс» (дата обращения: 22.04.2026).
2. Якушев, В.П. Роль дистанционного зондирования Земли в точном земледелии [Текст] / В. П. Якушев, В. В. Якушев, С. Ю. Блохина [и др.] // Вестник Российской академии наук. – 2023. – Т. 93, № 10. – С. 955-969. – DOI 10.31857/S0869587323100110.
3. Трошко, К.А. Особенности развития сельскохозяйственных культур в России в 2025 году на основе данных дистанционного мониторинга [Текст] / К. А. Трошко, П. В. Денисов, Е. А. Дунаева [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 5. – С. 449-458. – DOI 10.21046/2070-7401-2025-22-5-449-456.
4. Дубровин, К. Н. Разработка методики мониторинга пахотных земель Дальнего Востока на основе данных дистанционного зондирования Земли и машинного обучения [Текст]: диссертация ... кандидата технических наук: 1.6.19 / Дубровин Константин Николаевич; [Место защиты: Сибирский государственный университет геосистем и технологий]. – Новосибирск, 2025. – 148 с.
5. Дубровин, К.Н. Использование методов дистанционного зондирования Земли и машинного обучения для мониторинга пахотных земель Дальнего Востока [Текст] / К. Н. Дубровин, А. Н. Фролов, Д. А. Батяев, Т. Н. Федорова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2024. – Т. 4, № 1. – С. 20-25. – DOI 10.33764/2618-981X-2024-4-1-20-25.
6. Liu, N. Ensemble modelling based on transfer learning for enhancing crop mapping through synergistic integration of InSAR coherence and multispectral satellite data [Text] / N. Liu, Q. Zhao, R. Williams [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. – 2026. – Vol. 242. – P. 111332. – DOI 10.1016/j.compag.2025.111332.
7. You, N. Examining earliest identifiable timing of crops using all available Sentinel 1/2 imagery and Google Earth Engine [Text] / N. You, J. Dong // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2020. – Vol. 161. – P. 109-123.
8. Song, X.P. National-scale soybean mapping and area estimation in the United States using medium resolution satellite imagery and field survey [Text] / X.P. Song, P.V. Potapov, A. Krylov [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2017. – P. 383–395.
9. Cai, Y.P. A high-performance and in-season classification system of field-level crop types using timeseries Landsat data and a machine learning approach / Y.P. Cai, K.Y. Guan, J.Peng // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 210. – P. 35–47.
10. Единая федеральная государственная информационная система о землях сельскохозяйственного назначения [сайт]. – URL: <https://efis.mcx.ru/landing> (дата обращения: 10.04.2026).
11. База данных показателей муниципальных образований [сайт]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/dbscripts/munst> (дата обращения: 10.04.2026).

© К. Н. Дубровин, Л. В. Илларинова, Е. А. Фомина, 2026

С. А. Чигридов¹, Е. Н. Кулик¹✉

HARMONY: мобильная станция экологического мониторинга на базе общественного транспорта

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Аннотация. В статье представлены результаты разработки и полевых испытаний мобильной станции для мониторинга качества воздуха, предназначенной для установки на подвижной состав наземного общественного транспорта. Устройство на базе микроконтроллера ESP8266 оснащено датчиками TVOC и CO₂-экв. (SGP30), твердых частиц (PMS7003), атмосферного давления, температуры и влажности воздуха (BME280) и GPS-модулем (NEO-6M). Данные передаются в Google Sheets через HTTP POST. Разработан и апробирован алгоритм фильтрации сырых данных, включающий удаление измерений в зоне остановочных пунктов, пространственную агрегацию по регулярной сетке 100×100 м, усреднение параметров внутри каждой ячейки и экспорт в шейп-файл. Алгоритм реализован в среде ArcMap в виде модели ModelBuilder. В ходе тестовых треков сбора данных фильтрация позволила сократить количество анализируемых измерений на 61% (с 174 до 67). У созданных точек в поле «FREQUENCY» указывается количество исходных записей измерений, что позволяет при анализе различать прямые измерения и рассчитанные усредненные значения. Результаты исследования являются основой для построения карт распределения придорожного загрязнения атмосферы в рамках гибридной системы мониторинга HARMONY.

Ключевые слова: мобильный мониторинг, загрязнение атмосферы, ESP8266, фильтрация данных, ArcMap, ModelBuilder, пространственная агрегация, придорожное загрязнение

S. A. Chigridov¹, E. N. Kulik¹✉

HARMONY: mobile environmental monitoring station based on public transport

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Annotation. The article presents the results of the development and field testing of a mobile air quality monitoring station designed for installation on vehicles of ground-based public transport. The ESP8266 microcontroller-based device is equipped with sensors for TVOC and CO₂ (SGP30), particulate matter (PMS7003), atmospheric pressure, temperature and humidity (BME280) and GPS module (NEO-6M). The data is transmitted to Google Sheets via HTTP POST. An algorithm for filtering raw data has been developed and tested, including the removal of measurements in the area of bus stops, spatial aggregation on a regular 100×100 m grid, averaging parameters within each cell and exporting to a shapefile. The algorithm is implemented in the ArcMap environment as a ModelBuilder model. During the test data collection tracks, filtering reduced the number of analyzed measurements by 61% (from 174 to 67). For the created points, the quantity of measurements records is indicated in the «FREQUENCY» attribute field, which allows the analysis to distinguish between direct measurements and calculated average values. The results of the study are the basis for designing maps of the distribution of roadside air pollution within the framework of the HARMONY Hybrid Monitoring System.

Keywords: Mobile Monitoring, Atmospheric Pollution, ESP8266, Data Filtering, ArcMap, Model-Builder, Spatial Aggregation, Roadside Pollution

Введение

Контроль качества воздуха в городской среде, особенно в придорожных зонах, является актуальной задачей экологического мониторинга. Стационарные посты расположены редко и их данные не отражают реальную картину загрязнения вблизи дорог. Спутниковые данные (например, Sentinel-5P TROPOMI) имеют низкое пространственное разрешение, следовательно, теряются или нивелируются выбросы по площади города, что не позволяет выявить локальные пики загрязнения непосредственно у автомагистралей. Кроме того, спутниковые датчики измеряют интегральную концентрацию во всём вертикальном столбе атмосферы, оставаясь практически нечувствительными к приземному слою, где формируется и накапливается вредоносное загрязнение, влияющее на здоровье населения. Альтернативой является мобильный мониторинг с использованием подвижного состава общественного транспорта или легковых автомобилей.

Мобильные станции (МС) обеспечивают сбор детальных пространственных данных, однако формируют необработанный массив, содержащий измерения в зонах остановочных пунктов общественного транспорта, избыточную частоту записей измерений и прочие искажения. Неравномерность пространственного разрешения сырых данных, обусловленная изменением скорости носителя, приводит к искусственному завышению плотности измерений в точках длительной стоянки (остановки, заторы) и разрежению на участках свободного движения, что делает такой массив непригодным для прямой картографической интерполяции без предварительной фильтрации. Цель настоящего исследования – разработать МС и алгоритм фильтрации данных для последующего корректного построения карт придорожного загрязнения (рис. 1). Основная цель фильтрации – получить массив информации, отображающей ситуацию в потоке всех видов движущегося транспорта.



Рис. 1. Общая концепция мобильного мониторинга

Методы и материалы

Мобильная станция собрана на базе микроконтроллера ESP8266 (NodeMCU). Датчики подключаются по интерфейсам I2C (SGP30, BME280) и UART (PMS7003, GPS NEO-6M) (табл. 1) [1–5]. Питание – от бортовой сети автомобиля.

Таблица 1. Характеристики датчиков

Датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность
SGP30	TVOC, CO ₂ -eq	0...60000 ppb / 400...60000 ppm	±15%
PMS7003	PM _{1.0} , PM _{2.5} , PM ₁₀	0...500 мкг/м ³	±10%
BME280	Атмосферное давление, температура и влажность воздуха	300...1100 гПа	±1 гПа
NEO-6M	Координаты, скорость	—	2.5 м

Корпус спроектирован в CAD и напечатан на 3D-принтере (PETG, белый цвет). Вентиляционные отверстия организованы по принципу экрана Стивенсона – защита от прямых солнечных лучей и осадков при свободной циркуляции воздуха (рис. 2) [6].

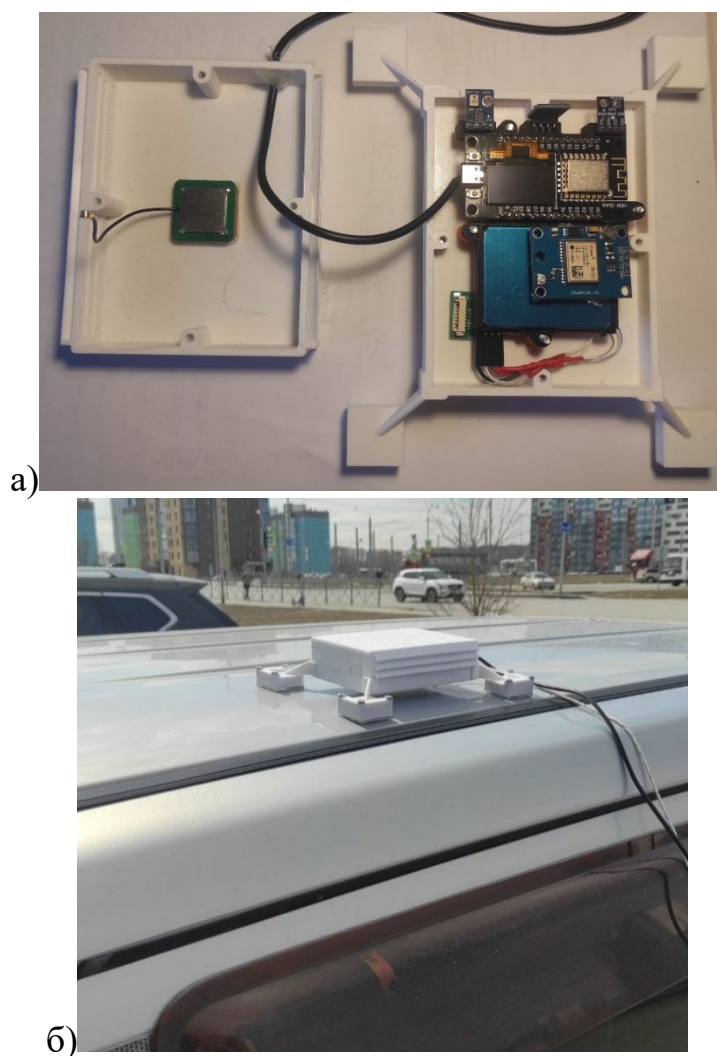


Рис. 2. Измерительный блок:

а) внутренняя компоновка элементов; б) установленный на автомобиль

МС подключается к Wi-Fi сети, данные в формате JSON отправляются в Google Sheets через HTTP POST (ESP8266HTTPClient) (рис. 3) [7, 8]. Периодичность опроса датчиков и отправки данных – каждые 7 секунд. При отсутствии связи данные буферизируются. Также реализовано отслеживание работоспособности подключенных датчиков. При запуске МС выполняется инициализация всех датчиков и в случае отсутствия ответа от датчика, в таблице Google Sheets ставится метка неисправности конкретного датчика. Экспорт в CSV для последующей обработки выполняется из интерфейса Google Sheets (Файл → Скачать).

Timestamp	#	Latitude	#	Longitude	#	Altitude	#	Speed	#	Satellites	#	Temp_BME
14.04.2026 8:52:06		54,987904		82,783768		120,5		0,1		8		2,5
14.04.2026 8:52:13		54,987911		82,783691		124,3		0,1		8		2,4
14.04.2026 8:52:20		54,987915		82,783638		124,3		0,1		7		2,4
14.04.2026 8:52:27		54,9879		82,783592		123,1		0,1		7		2,4

#	Hum_BME	#	Pressure	#	eCO2	#	TVOC	#	PM1.0	#	PM2.5	#	PM10	Статус
41,1		1014		402		0		4		5		6		Все датчики ОК
41,2		1014		400		0		4		6		7		Все датчики ОК
41,5		1014		400		0		4		6		8		Все датчики ОК
41,6		1014		404		0		4		6		8		Все датчики ОК

Рис. 3. Пример сырых данных в Google Sheets

Разработана модель в среде ArcMap (ModelBuilder), реализующая следующий порядок действий:

- удаление данных об измерениях в зоне остановочных пунктов. С использованием слоя положения остановок общественного транспорта строится буферная зона (расстояние подобрано эмпирически). Измерения МС в точках, попавших в эту зону, удаляются из массива анализируемых данных. Это исключает артефакты, связанные с длительной стоянкой (самозагрязнение и загрязнение выхлопными газами рядом стоящих единиц общественного транспорта);
- пространственная агрегация по сетке 100×100 м. Основное прореживание данных выполнено по регулярной сетке с шагом 100 м;
- ячейкам сетки, в которые попало более одной исходной точки сбора данных, по полю «FREQUENCY» присваивается значение, равное количеству записей измерений, которые были зафиксированы в исходном массиве измерений до выполнения фильтрации. Это позволяет при дальнейшем анализе различать прямые измерения и агрегированные значения;
- финальный массив с усредненными данными (агрегация по сетке в пространственном домене с усреднением измеряемых величин) экспортируется в шейп-файл для дальнейшего использования в моделях пространственного анализа и веб-картографии (рис. 4).

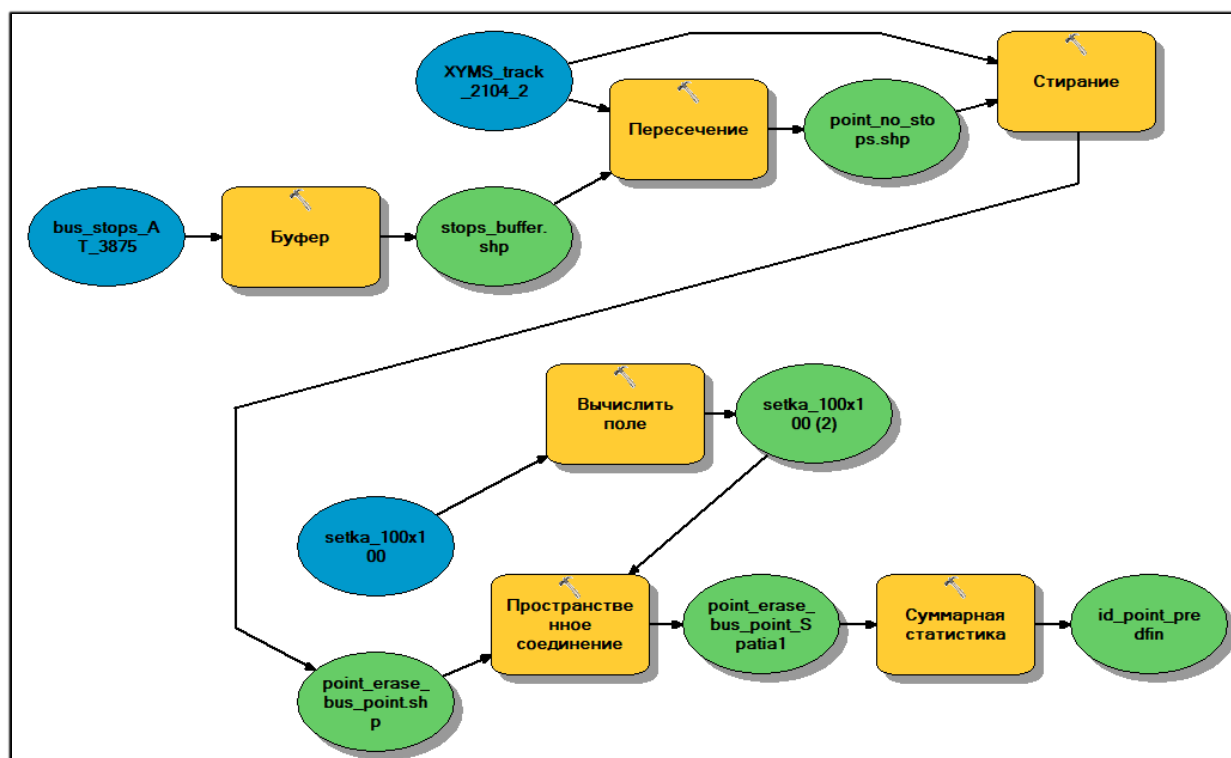


Рис. 4. Модель ModelBuilder в ArcMap

Описанный алгоритм фильтрации в текущей реализации требует ручного экспорта CSV и загрузки в ArcMap. В рамках развития сервиса HARMONY планируется полная автоматизация пайплайна: данные с МС будут поступать на серверный модуль, который автоматически запускает фильтрацию, агрегацию и сохраняет результат в базу данных, исключая ручные операции.

Результаты

В результате фильтрации получены количественные показатели (табл. 2, рис. 5, 6).

Таблица 2. Количество точек на каждом этапе фильтрации

Этап	Количество точек	Сокращение, %
Сырые данные (отправка 1/7 Гц)	174	—
После фильтрации данных в зонах остановочных пунктов	97	44% (от сырых)
После агрегации по сетке 100×100 м	67	61% (от сырых)



Рис. 5. Результаты этапов фильтрации трека измерений:

а) исходный трек; б) точки трека после фильтрации по буферам остановочных пунктов; в) результирующие положения точек трека измерений после агрегации и усреднения значений

Id	FREQUENCY	LAST Times	MEAN Latit	MEAN Longi	MEAN Altit	MEAN Speed	MEAN Satel	MEAN Temp1	MEAN Hum B	MEAN Press
17264	1	14.04.2026	54,987331	82,808807	115,8	44,3	8	6,3	30,7	1014
17272	1	14.04.2026	54,98737	82,816216	109,5	46,7	12	4,6	33,7	1013
17665	1	14.04.2026	54,988613	82,810051	115,4	39,6	8	6,8	31,7	1014
17871	1	14.04.2026	54,988857	82,815132	112,3	31,6	11	4,6	33,2	1014
14480	2	14.04.2026	54,98011	82,823498	109,25	18,9	11	6,05	31,95	1014
14701	2	14.04.2026	54,980713	82,842079	114,2	37,7	11	5,6	31,6	1013
15480	2	14.04.2026	54,982548	82,822975	109,9	1,4	12	5,6	31,5	1014
16673	2	14.04.2026	54,985733	82,8172	109,7	52,2	11	4,65	33,25	1013,5
14914	3	14.04.2026	54,981258	82,853864	120,733333	30,033333	11	6,6	30,866667	1012,666667
15337	3	14.04.2026	54,982138	82,87486	140,666667	11,166667	8,666667	5,233333	31,633333	1010
17870	3	14.04.2026	54,988795	82,814107	113,866667	43,6	10	5,633333	32,1	1013,333333
14916	4	14.04.2026	54,981346	82,855862	122,05	48,35	11	6,625	31,025	1012,75
15857	4	14.04.2026	54,983797	82,802919	113,325	8,975	7,25	6,85	29,5	1015
17464	4	14.04.2026	54,98792	82,808733	116,15	6,375	9	6,2	31,025	1015
15124	5	14.04.2026	54,981565	82,862915	125,24	6,74	10,4	6,22	30,74	1012
14919	8	14.04.2026	54,98142	82,858059	122,4625	3,8	10,75	5,85	31,6625	1013

Рис. 6. Фрагмент таблицы атрибутов результирующего слоя положения точек трека измерений после фильтрации

Обсуждение

Выбор шага агрегации 100×100 м обусловлен типовым масштабом городских экологических задач (размер квартала, ширина дорожной полосы) и достаточен для последующего пространственного анализа. Шаг менее 100 м приводит к появлению множества пустых ячеек из-за дискретности исходных измерений, а шаг более 100 м нивелирует пространственную неоднородность загрязнения в масштабе магистрали. При этом интервал измерений (7 с) выбран эмпирически

как технический компромисс: более частая отправка записей перенасыщает массив и не улучшает пространственное разрешение, более редкая — ведёт к переполнению буфера микроконтроллера.

Значение «FREQUENCY» даёт возможность при анализе собранных измерений различать те ячейки сети, где было собрано несколько измерений (например, на перекрёстке или при медленном движении), и ячейки с одиночными точками записи. Это позволит контролировать процесс моделирования распространения загрязнения и в случае необходимости исключить из анализа точки с усредненными значениями измерений.

Заключение

Разработана мобильная станция экологического мониторинга на базе ESP8266 с датчиками SGP30, PMS7003, BMP280 и GPS NEO-6M. Создан и апробирован алгоритм фильтрации данных в среде ArcMap.

Полученный после фильтрации массив данных является основой для построения карт распределения придорожного загрязнения воздуха и верификации корректности модели рассеивания вредных веществ, реализуемой внутри гибридной системы мониторинга HARMONY.

В перспективе, измерения с мобильных станций будут передаваться непосредственно на сервер геосервиса HARMONY, минуя промежуточное табличное хранилище.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. SGP30. Data Sheet [Электронный ресурс] // Sensirion – URL: https://sensirion.com/media/documents/984E0DD5/61644B8B/Sensirion_Gas_Sensors_Datasheet_SGP30.pdf (дата обращения 15.03.2026).
2. BME280. Data Sheet [Электронный ресурс] // Chipdip – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/294/DOC029294483.pdf> (дата обращения 15.03.2026).
3. PMS7003. Data Sheet [Электронный ресурс] // Espruino – URL: <https://www.espruino.com/datasheets/PMS7003.pdf> (дата обращения 15.03.2026).
4. U-blox 6 GPS Modules. Data Sheet [Электронный ресурс] // Chipdip – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/473/DOC042473703.pdf> (дата обращения 15.03.2026).
5. ESP8266 NodeMCU WiFi Devkit [Электронный ресурс] // Handson Technology – URL: <https://images.theengineeringprojects.com/document/main/datasheet/NodeMCU-V3.pdf> (дата обращения 15.03.2026).
6. Что такое экран Стивенсона [Электронный ресурс] // Wikipedia – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Stevenson_screen (дата обращения 05.04.2026).
7. Введение в работу с Apps Script в Google Таблицах [Электронный ресурс] // Timeweb – URL: <https://timeweb.com/ru/community/articles/vvedenie-v-rabotu-s-apps-script-v-google-tablicah> (дата обращения 05.04.2026).
8. Краткое руководство по сценариям Google Apps [Электронный ресурс] // Developers.Google – URL: <https://developers.google.com/workspace/sheets/api/quickstart/apps-script?hl=ru> (дата обращения 05.04.2026).

© С. А. Чигридов, Е. Н. Кулик, 2026

*Е. Л. Касьянова¹, Д. Ш. Бахтиярова², Э. Р. Мирмахмудов^{2✉}, Р. М. Наврузов²,
Д. А. Абжапарова³*

О топографо - геодезическом обеспечении окрестности андижанского водохранилища

¹Сибирский Государственный Университет Геосистем и Технологий,
Новосибирск, Российская Федерация

²Национальный Университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

³Ошский Государственный Университет, г. Ош, Кыргызстан
e-mail: erkin_mir@mail.ru

Аннотация. В данной работе приведены графические и топографические данные окрестности Андижанского водохранилища для инженерно-строительных работ. Описаны климатические и антропогенные процессы в весенние и осенние периоды. Описываются первые геодезические работы по созданию планово-высотного обоснования исследуемого района. Произведен расчет координат углов рамок трапеций крупномасштабных топографических карт изучаемого региона. Выполнено геометрическое нивелирование I и II разряда вдоль трассы плотины с цифровым нивелиром. Для уточнения координат пунктов ГГС были выполнены полевые ГНСС измерения. Предлагается использовать CORS сеть для привязки к международной геодезической системе координат WGS84. Составлены рекомендации для улучшения координат пунктов ГГС окрестности водохранилища, привлекая современные цифровые технологии.

Ключевые слова: топографические карты, система координат, геодезические работы, нивелирование, ГНСС съемка

*E. L. Kasyanova¹, D. Sh. Bakhtiyarova², E. R. Mirmakhmudov^{2✉}, R. M. Navruzov²,
D. A. Abzhaparova³*

About topographical and geodetic support of the terrain near the andijan reservoir

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

²National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

³Osh State University of Uzbekistan, Osh, Ryrrgyzstan

Abstract. Graphic and topographic data of the vicinity of the Andijan reservoir are given in this article for geodetic support. Emergencies and phenomena associated with climatic and anthropogenic processes are noted. The first geodetic works on the creation of rectangular and vertical coordinates of the studied area are described. The coordinates of trapezoids of large-scale topographic maps of the studied area were calculated. Geometric leveling of the 1st and 2nd categories was carried out along the dam route using a digital level. GNSS measurements were performed in static mode to refine the coordinates of the SGN. Use the CORS network for referencing to the international geodetic system WGS84 is proposed here. Recommendations have been developed to improve the rectangular and vertical coordinates of the reservoir's vicinity using modern digital technologies.

Keywords: topographic maps, coordinate system, geodetic works, leveling, GNSS survey

Введение

Андижанское водохранилище (рис.1) является основным гидротехническим сооружением Ферганской долины и имеет важное значение для ирригации, мелиорации, водоснабжения населенных пунктов и орошения сельскохозяйственных угодий Республики Узбекистан и Кыргызстан. Оно построено на реке Карадарья между Андижанской и Ошской областями [1]. Питание реки снегово-ледниковое: максимальные расходы ее приурочены к летним, а минимальные, к зимним месяцам. Начиная с марта расходы быстро возрастают, так как поступают воды преимущественно снегового питания. В мае, во время таяния ледников, продолжается увеличение расходов, которые достигают максимума в июне. В этот период прибрежные участки реки подвержены селевым потокам, оползням и обвалам, создавая сложную обстановку в регионе.



Рис. 1. Андижанское водохранилище

Известно, что основную площадь окрестности водохранилища составляют предгорные массивы [5], отроги Ферганского и Алайского хребтов, где сосредоточены разнообразные формы рельефа, сформировавшиеся в результате длительных геофизических и геологических процессов. Значительный перепад абсолютных высот в сочетании с широтным простиранием горных хребтов и расчленённостью рельефа обуславливают высотную климатическую поясность данного района. По своему рельефу окрестность имеет предгорный и равнинный характер с неровной поверхностью (рис. 2). Активные тектонические процессы определяют высокую сейсмичность Ферганской депрессии [7]. До сих пор в этом районе происходят землетрясения, возникают оползни, обвалы и селевые потоки [10]. Основные проблемы, которые возникли в последнее время – это климатические и антропогенные процессы, непредсказуемые изменения уровня водной поверхности, отсутствие уточненных топографических и батиметрических карт.



Рис 2. Обзорная схема района Андижанского водохранилища

Первые геодезические работы исследуемой территории были выполнены специалистами аэрогеодезического предприятия №12 главного управления геодезии и картографии в 1960-1970 годы. Основная задача заключалась в создании государственной геодезической сети (ГГС) и сетей сгущения для инженерно-изыскательских работ [3].

В настоящее время топографо-геодезическое обеспечение включает несколько взаимосвязанных компонентов: традиционную геодезическую сеть, топографические карты различных масштабов, данные дистанционного зондирования Земли [13], результаты GPS-наблюдений и батиметрические материалы. Геодезическая сеть содержит пункты триангуляции I–III класса, нивелировочные репера I–IV класса и опорные точки съёмочного обоснования [2]. Следует отметить, что в течение почти 40 лет геодезическая сеть не подвергалась повторному измерению и обновлению. С тех пор рельеф прибрежной зоны, береговая линия и состояние пунктов геодезической сети претерпели существенные изменения. Если рассматривать систему координат на территории Средней Азии [9], то становится очевидным о необходимости уточнения планово-высотной основы и редактирования топографических карт [4].

В начале XX века на территории Средней Азии была введена система координат СК32, редуцированная на поверхность референц-эллипсоида Бесселя (1841). Позднее, был разработан более точный референц-эллипсоид Красовского, параметры которого легли в основу системы координат СК42, а также при составлении топографических карт. СК42 использовалась на протяжении 60 лет и по настоящее время используется во многих организациях. Что касается топографических карт различного масштаба, то они были составлены в проекции Гаусса-Крюгера с шестиградусной картографической зоной. Высоты были вычислены относительно Кронштадтского футштока в Балтийской системе высот.

С внедрением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) возникла необходимость трансформации координат из системы координат СК42 в международную геодезическую систему WGS-84, что потребовало уточнения параметров математической основы топографических карт.

Целью данного исследования является анализ топографо-геодезического обеспечения и выявление оптимальных путей повышения точности планово-высотного обоснования с использованием цифровых технологий.

Для реализации поставленной цели необходимо произвести анализ физико-географических характеристик и топографических данных исследуемой территории.

Методика и материалы

Исходными данными для выполнения геодезических работ являются топографические карты масштаба 1:500 000 и 1:100 000, а также графические материалы для исследуемой территории [6].

Территория Андижанского водохранилища расположена между географическими широтами $40^{\circ}42' - 40^{\circ}50'$ и долготами $73^{\circ}00' - 73^{\circ}14'$. Исходной номенклатурой топографических карт данной территории является лист миллионного масштаба К-43. В масштабе 1 : 100 000 окрестность покрывает пять листов трапечей: К-43-099, К-43-110, К-43-111, К-43-112 и К-43-123, при этом основной лист К-43-111 полностью охватывает акваторию водохранилища (рис. 3).

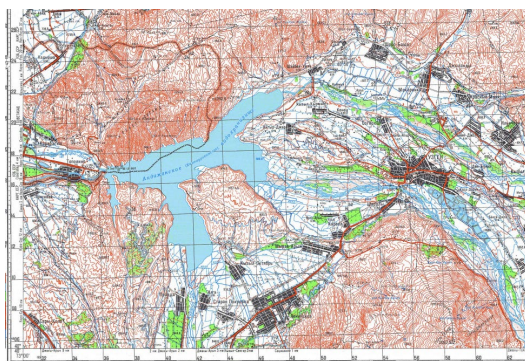


Рис. 3. Фрагмент топографической карты масштаба 1:100 000 К-43-111

Исследуемая территория на топографической карте масштаба 1 : 50 000 имеет номенклатуру К-43-111-В. Однако в открытом доступе такие материалы еще не доступны (рис. 4), а геодезические и прямоугольные координаты, дирекционные углы, азимуты и ориентирные направления пунктов ГГС приводятся в специальном каталоге.

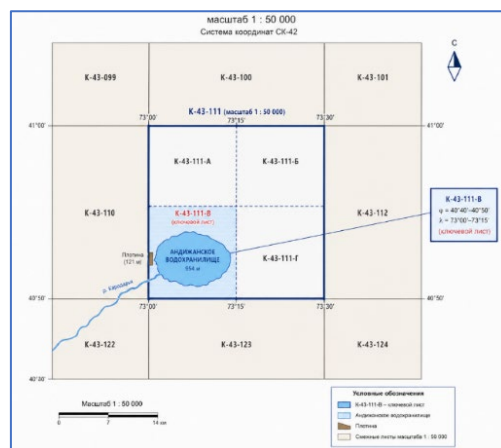


Рис. 4. Расположение Андижанского вдхр. 1 : 50 000

Ниже приведена (Таб.1) сводка номенклатурных листов топографических карт водохранилища от миллионного до 1 : 50 000 масштаба.

Таблица 1. Сводка номенклатурных листов

Масштаб	Номенклатура листов	Листов	Охват территории
1 : 1 000 000	К-43	1	Ферганская долина
1 : 500 000	К-43-В	1	Восточная часть долины
1 : 200 000	К-43-XXXV К-43-XXXVI	2	Район водохранилища
1 : 100 000	К-43-099, К-43-110, К-4111, К-43-112, К-43-123	5	Окрестности водохранилища
1 : 50 000	К-43-111-А, К-43-111-Б, К-43-111-В, К-43-111-Г	4	Прибрежная зона
1 : 25 000	Отдельные листы	16	Зона гидроузла

Рекогносцировка геодезических пунктов производилась с применением электронных крупномасштабных топографических карт, мобильных навигаторов и космических снимков Google Earth Map.

Для высотной составляющей было использовано геометрическое нивелирование I и II разряда [14] с цифровым нивелиром Trimble DiNi 03 (№ 738966, Германия) и парой геодезических инварных реек. Порядок наблюдений на нечётных станциях – BFFB, на чётных – FBFB. Нивелирование I разряда выполнялось одним замкнутым ходом между фундаментальными реперами по гребню верхнего бьефа плотины; нивелирование II разряда – двумя замкнутыми ходами по маркам нижнего бьефа. Схема нивелирных ходов приведена на рис. 5.



Рис. 5. Схема нивелирования

Для уточнения координат пунктов ГГС в 2024 году были выполнены полевые измерения с использованием двухчастотного многоканального GNSS-приёмника. Измерения проводились в режиме статики не менее 60 минут на каждом пункте. В качестве исходных данных использовались координаты действующих референционных станций CORS сети Узбекистана (рис.6).



Рис.6. Схема мониторинга водохранилища со станциями CORS

Результаты

Обработка полевых материалов выполнялась в Microsoft Excel и CREDO-DAT, которая включала введение поправок за температурные деформации инварных реек, составление ведомостей высот пунктов и оценку точности по результатам измерений.

Выполнение ГНСС съёмки в предгорных районах сопряжено со значительными техническими трудностями и финансовыми затратами. Особую сложность

представляет поиск и рекогносцировка пунктов, расположенных в труднодоступных районах. Тем не менее, полевые геодезические работы в этих местах, где расположены особо ответственные гидротехнические сооружения, выполняются с соблюдением всех нормативных требований и инструкций. Поскольку по данной территории проходят межгосударственные границы, ирригационные каналы и установлены гидротехнические сооружения, роль спутниковых геодезических измерений приобретает особый статус. Такие работы являются важными и актуальными для уточнения координат пунктов геодезической сети и математической основы топографических карт.

Обработка результатов ГНСС измерений выполнялась в программном комплексе Leica Geo Office [11]. Пересчёт координат из системы WGS-84 [12] в СК42 производился по параметрам трансформирования методом Гельмерта. Ниже в таблице 2 приведены значения разности геоцентрических координат между системами координат СК42 и WGS84 для трех пунктов, расположенных на территории Республики Узбекистан. Были использованы классические пункты ГГС (вблизи водохранилища), репера Центрально-Азиатской Геодинамической сети (CATS, MADA, гора Майданак) и международную IGS станцию KIT3 в Китабе.

Таблица 2. Разность между двумя системами координат по методу Гельмерта

DATUM	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$	Пункт	Территория
СК42- WGS84	+22	-125	-88	IGS KIT3	Узбекистан
СК42- WGS84	+23	-124	-89	ГГС, вдхр	Узбекистан
СК42- WGS84	+25	-123	-80	CATS, MADA	Узбекистан

Обсуждение

Плотина является единственным гидросооружением в Узбекистане, которая требует непрерывного высокоточного геодезического мониторинга за деформацией. Значительная часть пунктов геодезической сети утрачена или не проверялась десятилетиями. Таким образом, возникает необходимость в комплексном обследовании и обновлении всего топографо-геодезического обеспечения данного района с применением современных спутниковых систем.

В перспективе целесообразно разработать комплексную программу геодезического мониторинга водохранилища, учитывая наземные геодезические измерения, данные спутниковой навигации и результаты ДЗЗ.

Заключение

Приведённые данные об окрестности водохранилища предъявляет принципиально особые требования к точности и периодичности геодезического контроля. Береговая линия, рельеф прибрежной зоны и состояние пунктов ГГС претерпели существенных изменений, которые не отражены в действующих картографических материалах. Выполненные в 2024 году контрольные ГНСС-измерения подтвердили, что

координаты ряда опорных пунктов в системе СК42 не соответствуют современным требованиям точности и нуждаются в переопределении. Имеющиеся пункты ГГС, данные ДЗЗ и результаты ГНСС-наблюдений не приведены к единой актуальной системе координат, что создаёт серьёзные трудности при построении пространственной цифровой модели местности для района водохранилища.

Естественно, такое состояние привело к тому, что возникает необходимость в реализации следующих рекомендаций:

- провести рекогносцировку пунктов ГГС окрестности водохранилища с применением ГНСС-технологий и восстановление утраченных знаков;
- выполнить новую крупномасштабную топографическую съёмку прибрежной зоны в масштабе 1 : 5 000 с применением аэрофотосъёмки с БПЛА;
- создать единую цифровую модель рельефа (ЦМР) в системе WGS-84 с трансформацией в национальную систему СК42 на основе совместной обработки данных SRTM, нивелировочных ходов и ГНСС измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вишневский Н. Водохранилище на Кара-Дарье. “Гидротехника и мелиорация”, 1975, №8.
2. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – М.: Недра, 1990.
3. Инструкция по топографической съёмке в масштабах 1 : 5 000 – 1 : 500 (ГКИНП-02-033-82). – М.: Недра, 1982.
4. Куштаров Б.А. Оценка точности геодезических сетей Ферганской долины. – Ташкент: ТГТУ, 2005. – 180 с.
5. Медведев В.Д. Андижанское водохранилище (краткий очерк строительства). Ташкент:- Узбекистан, 1981. – 124с.
6. ООО «Гидротехмониторинг». Технический отчёт № I MG-1-25 о результатах инженерно-геодезических наблюдений на плотине Андижанского водохранилища. – Ташкент, 2025.
7. Сейсмичность районов строительства Киргизии. Фрунзе. “Ил”. 1967.
8. ШНҚ 1.02.18-09. Геодезическая опорная сеть. Свод правил.–Ташкент: Узгеодезкадастр, 2009.
9. Mirmakhmudov E. Modification of the reference frame of Uzbekistan topographic maps based on the GNSS. Coordinates.V. XIII, № 04, April 2017.P.32-37.
10. Mirmakhmudov E., Abzhaparova D., Tashbaltaeva Sh., Mamadaminova B., Hakimova M. Geophysical research on a landslide-prone slope in the vicinity of the village of Ayusay in the Republic of Kyrgyzstan. E3S Web of Conferences 590, 03007 (2024) GI 2024. Pp 1-8.
11. Leica Geo Office Software. User Manual. Version 8.4.– Heerbrugg: Leica Geosystems, 2018.
12. Reigber C. et al. GPS constraints on the distribution of deformation in Central Asia // Terra Nostra. – 1999. – № 127.
13. Shukina O. et al. Using digital photogrammetry to create large-scale topographic maps in Uzbekistan // International Journal of Geoinformatics. 2022. Vol. 18. № 1.
14. Trimble DiNi 03 Digital Level. User Guide. – Sunnyvale: Trimble Navigation, 2012.

© *Е. Л. Касьянова, Д. Ш. Бахтиярова, Э. Р. Мирмахмудов, Р. М. Наврузов,
Д. А. Абжапарова, 2026*

С. В. Жила^{1✉}, Е. А. Артемихина¹, И. В. Фуряев¹

Пирофитность сосны (*Pinus sylvestris* L.): исследование адаптивных реакций древесины на лесные пожары в Прибайкалье методом термогравиметрии

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация
e-mail: getgain@mail.ru

Аннотация. Методом термогравиметрии исследованы адаптивные реакции древесины *Pinus sylvestris* L. на повторные лесные пожары в Южной Сибири. Выполнен термогравиметрический анализ (ТГ/ДТГ) образцов древесины из годовичных колец в годы пожара (F), предшествующий (PF) и последующий (PTF) периоды. Выявлено, что пирогенное воздействие инициирует устойчивые изменения лигнин-углеводной матрицы: снижается содержание целлюлозы, и повышается содержание гемицеллюлоз и лигнина. При этом, термическая стабильность целлюлозы и лигнина в образцах со следами пожара повышается. Наиболее выраженные сдвиги зафиксированы для пожаров высокой интенсивности (1915, 1950 гг.). Показано, что парные соотношения лигнин/целлюлоза и лигнин/гемицеллюлоза выступают маркерами восстановления после теплового шока. Полученные данные подтверждают наличие у *P. sylvestris* механизмов для физиолого-биохимических адаптаций, позволяющих данному виду сохранять жизнеспособность и восстанавливать камбиальную активность после высокотемпературного стресса. Интеграция дендрохронологического и термохимического подходов рекомендуется для прогноза устойчивости лесов при меняющихся режимах пожаров.

Ключевые слова: изменения климата, лесной пожар, сосна обыкновенная, пирофитность, годовичные кольца, термогравиметрия

S. V. Zhila^{1✉}, E. A. Artemikhina¹, I. V. Furyaev¹

Pyrophytic properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): Study of adaptive responses of wood to forest fires in the Baikal region using thermogravimetry

¹V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation
e-mail: getgain@mail.ru

Abstract. The adaptive responses of *Pinus sylvestris* L. wood to repeated forest fires in Southern Siberia were studied using thermogravimetry. Thermogravimetric analysis (TG/DTG) of wood samples from annual rings was performed in the years of fire (F), preceding (PF), and following (PTF) periods. Pyrogenic exposure was found to initiate persistent changes in the lignin-carbohydrate matrix: the content of cellulose decreases, and the proportion of lignin and cellulose content increases. At the same time, the thermal stability of cellulose and lignin in samples with traces of fire increases. The most pronounced shifts were recorded for high-intensity fires (1915, 1950). Paired lignin/cellulose and lignin/hemicellulose ratios are shown to act as markers of recovery after heat shock. The data obtained confirm the presence of physiological and biochemical adaptation mechanisms in *P. sylvestris*, allowing this species to maintain viability and restore cambial activity after high-temperature stress. The integration of dendrochronological and thermochemical approaches is recommended for predicting forest resilience under changing fire regimes.

Keywords: climate change, forest fire, Scots pine, pyrophytic properties, tree rings, thermogravimetry

Введение

Современный период лесообразовательных процессов обнажает актуальную проблему устойчивости и продуктивности лесных экосистем, сопряжённую с ролью лесов в глобальных экологических процессах [1-3]. Сосновые леса занимают значительную долю хвойных массивов Сибири и служат основной породой для лесной промышленности [4, 5]. Будущие климатические условия будут более благоприятны для пожаров, поэтому управление лесными экосистемами необходимо для смягчения последствий растущей частоты нарушений [3, 6, 7]. Частота пожаров и средний межпожарный интервал определяют долговременную динамику бореальных лесов и их устойчивость к пирогенному воздействию [8].

Вопросы устойчивости древесных растений к пирогенному воздействию рассматривались многими исследователями [9-14]. Так, в отечественных исследованиях, у молодых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), в ходе экспериментального низового пожара, количество и размер поздних трахеид уменьшились, а годовичные кольца стали уже, чем до пирогенного воздействия [9]. В ходе исследований у североамериканских авторов огонь оказал значительное влияние на структуру смоляных каналов сосны желтой (*Pinus ponderosa* Dougl ex P. & C. Laws.) [14]. Европейские авторы отметили замедление роста и снижение водного потенциала после пожара [10]. В более ранних исследованиях сосны калабрийской (*Pinus brutia* Ten.) отмечено повышение уровня неструктурных белков и аскорбиновой кислоты в хвое после пирогенного воздействия, при этом содержание растворимых сахаров и неструктурных белков во флоэме снизилось [13]. Однако эти данные не объясняют процессы в годовичных кольцах в год пожара и после него. Актуально изучение пород, сохраняющих жизнедеятельность после пирогенного воздействия [9, 10]. К таким относится *P. sylvestris*, способная сохранять и расширять ареал благодаря пиропитным свойствам [15-17]. Пиропитность – способность «противостоять» огню (огнестойкость, пожароустойчивость насаждений, возобновление на горячих). Эти адаптации – следствие длительной эволюции в условиях континентального климата с частыми пожарами [15, 16].

Традиционные дендрохронологические методы, базирующиеся на анализе ширины годовичных колец и визуальной регистрации пожарных подсушин, представляют собой наиболее точный и апробированный инструмент датирования лесных пожаров [11, 12, 18, 19]. Дальнейшим развитием инструментария экологических реконструкций стал дендробиохимический подход [20, 21]. Применение дендробиохимического подхода для изучения деревьев, неоднократно подвергавшихся воздействию пожаров позволяет количественно оценить физиологический ответ дерева на термический стресс [22].

Исходя из вышесказанного, цель работы – на примере сосны обыкновенной в Южной Сибири (зоне высокой пожарной активности) оценить влияние пожаров на физико-химические и биохимические процессы в нарушенных лесных экосистемах для совершенствования лесоправления.

Методы и материалы

Объекты исследования – сосняки на сухих бедных почвах в Хоринском лесничестве Республики Бурятия (водоохранная зона озера Байкал, Забайкальский горно-таёжный район). Отбор образцов проведён в сосновом насаждении, неоднократно пройденном пожарами. Для построения хронологии пожаров отобраны спилы (более 30 шт.) с деревьев, имеющих пожарные подсушины. Ширину годичных колец измеряли на приборе LINTAB, датировку пожаров проводили по методике T.W. Swetnam [18]. Анализ истории пожаров выполнен с помощью программы FNAES [23], основанной на [24], которая позволяет анализировать пространственно-временную изменчивость динамики пожаров по пожарным подсушинам на спилах. Данные о пожароопасных годах сопоставлены с исследованием E.R. Bigio [25].

Для термогравиметрического анализа отобраны годичные кольца с пожарными подсушинами: в годы пожаров (F), предшествующие (PF) и последующие (PTF) годы. Проанализированы образцы за 1828, 1837, 1893, 1915, 1950, 1972, 1998, 2007 гг. Древесину годичных колец измельчали в порошок на криомельнице IQ MILL-2070 (Frontier, Япония). После кондиционирования до равновесной влажности ~65 % проводили термический анализ. Термогравиметрию (ТГ) выполняли на анализаторе TG 209 F1 Libra (Netzsch, Германия).

Статистические тесты проведены в R (v.4.4.1), значимость принята при $p < 0,05$. Для визуализации использовали пакеты «Tidyverse», «Permiso».

Исследование выполнено на термомикровесах TG 209 F1 Libra Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Результаты

В ходе анализа пространственно-временной изменчивости динамики пожаров с использованием пожарных подсушин в исследуемых насаждениях был определен средний межпожарный интервал, который составил 23,7 лет.

На рисунке 1 представлены термогравиметрические (ТГ) кривые и производные ТГ-кривых (ДТГ) для образцов 1892 (PF), 1893 (F) и 1894 (PTF), а также ТГ-кривые для контрольного образца, полученные в результате ТГ-анализа древесины в окислительной среде.

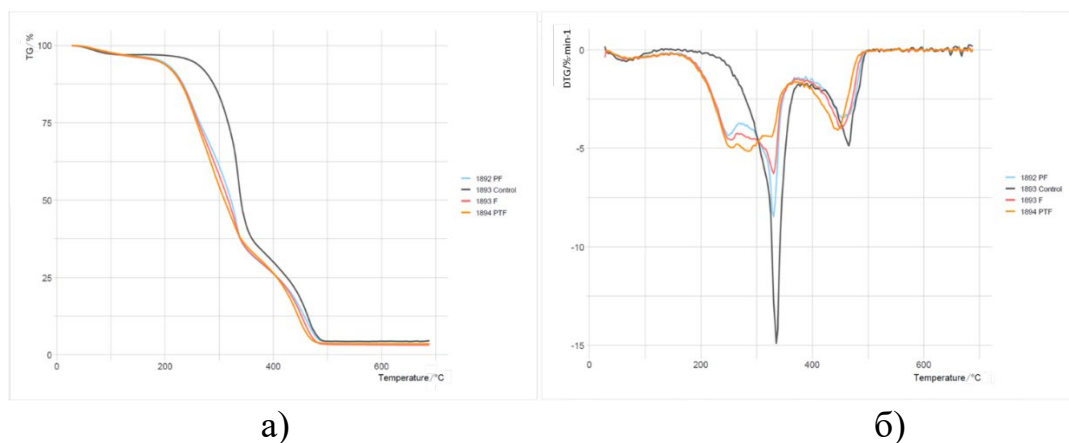


Рис. 1. ТГ (а) и ДТГ (б) кривые термодеструкции древесинного вещества из годовичных колец *P. sylvestris* 1892–1894 гг.

Потеря массы на кривых ТГ ниже 180 °С объясняется испарением воды и летучих соединений (Δm_1) [26]. В диапазоне 180–700 °С образцы *P. sylvestris*, подвергшиеся воздействию термического шока, показали три пика на кривых ДТГ, контрольные – два пика. Первая стадия (обугливание, 230–375 °С) включает разложение гемицеллюлозы (Δm_2) и целлюлозы (Δm_3) с образованием CO_2 , CO , CH_4 и др. [27]. Вторая стадия (прокаливание, 400–505 °С) включает разложение лигнина (Δm_4) и окисление угля [28]. Дегградация целлюлозы (до 380 °С) проявлялась чётким пиком на ДТГ. Скорость потери массы целлюлозы в контрольных образцах практически не изменялась с ростом дерева, а в образцах, подвергнутых огню, увеличивалась. Максимальная скорость потери массы была выше для контрольных образцов (15,2–16,8 %·мин), для обожжённых – от 8,1 до 17,1 %·мин.

Третий этап – дегградация остаточного лигнина и окисление угля (Δm_4). В образцах, подвергнутых огню, скорость потери массы на этом этапе с возрастом деревьев увеличивалась (в контроле – без изменений). Термическая стабильность лигнина в контрольных образцах смещалась к более низким температурам, в обожжённых – к более высоким, что указывает на более медленное разложение термически стабильного лигнина после пожара.

Обсуждение

Данные указывают на изменение термических характеристик годовичных колец *P. sylvestris* в 1915 и 1950 гг. (годы наиболее разрушительных пожаров в Сибири). Парные соотношения гемицеллюлоза/вода, целлюлоза/вода и лигнин/вода достигли максимумов, содержание влаги в клеточных стенках резко возросло за счёт конденсации водяного пара [10]. В эти годы, по литературным данным, температура у ствола могла достигать 1000 °С [29]. Соотношения лигнин/гемицеллюлоза и лигнин/целлюлоза изменились: количество целлюлозы уменьшилось, а содержание гемицеллюлоз, лигнина и воды увеличилось вследствие термического шока [30], что указывает на способность сосны сохранять жизнеспособность даже после пожаров высокой интенсивности.

Стресс от высокой температуры и дефицита воды запускает биохимические сдвиги. Синергетическое воздействие снижает синтез целлюлозы (через угнетение экспрессии генов и активности ферментов) [29] и изменяет синтез лигнина (вероятно, увеличивая его за счёт мономеров). Повышенное содержание гемицеллюлоз в образцах с подсушинами возможно, связано с арабиногалактаном типа II, который укрепляет клеточную стенку и способствует термотолерантности. Несмотря на снижение содержания целлюлозы, ее термическая стабильность у деревьев со пожарными подсушинами, повышается, что соответствует приобретению термотолерантности с участием ферментов ремоделирования клеточной стенки. Повышение термостойкости лигнина и целлюлозы, а также увеличение содержания гемицеллюлоз открывают возможности для изучения пиропитного роста сосны.

Заключение

Результаты дают представление о физиологических и биохимических реакциях *P. sylvestris* на повторные пожары в Байкальском регионе. Средний межпожарный интервал (23,7 года) подтверждает историческую распространённость пожаров. Термогравиметрия выявила модификации в термическом поведении гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина между подвергшемся термическому шоку образцами сосны и контрольными образцами, что указывает на адаптивные механизмы сосны. Анализ трансформации полимеров после пяти пожаров показал, что повторяющийся термический шок снижает содержание целлюлозы, повышают содержание лигнина и гемицеллюлоз. Несмотря на снижение целлюлозы, её термическая стабильность, как и стабильность лигнина, возрастает. Кроме того, выявлено, что у деревьев, испытавших термический шок, выше содержание гемицеллюлоз, что по-нашему мнению свидетельствует о способности вида восстанавливать камбий и регенерировать ткани после пожаров, что подразумевает под собой эволюционную адаптацию. Исследование углубляет понимание механизмов адаптации: модуляция динамики лигнина и углеводов обеспечивает экологический успех сосны в пожароопасных районах. Растущая частота пожаров в Сибири требует активных стратегий управления, а интеграция дендрохронологических и биохимических подходов даёт основу для прогноза устойчивости лесов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках двух государственных заданий Института леса ФИЦ КНЦ СО РАН - FWES-2024-0007 и FWES-2024-0028

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванова Г.А., Иванов А.В. Пожары в сосновых лесах Средней Сибири. – Новосибирск : Наука, 2015. – 238 с.
2. Брюханов А.В., Панов А.В., Пономарев Е.И., Сиденко Н.В. Пирогенное влияние на основные лесобразующие породы Приенисейской Сибири // Геофизические процессы и биосфера. – 2018. – Т. 17, № 4. – С. 26-40. – DOI: 10.21455/GPB2018.4-2.

3. Furyaev V.V., Vaganov E.A., Tchebakova N.M., Valendik E.N. Effects of fire and climate on successions and structural changes in the Siberian boreal forest // Eurasian Journal of Forest Research. – 2001. – Vol. 2. – P. 1-15.
4. Рысин Л.П., Савельева Л.И. Сосновые леса России. – М. : Товарищество научных изданий КМК, 2008. – 288 с.
5. Гребенюк А.Л., Матвеева А.Г. Возрастная структура и состав высокобонитетных сосновых лесов Прибайкалья // Сибирский лесной журнал. – 2025. – № 3. – С. 45-55. – DOI: 10.15372/sjfs20250305.
6. McLauchlan K.K., Higuera P.E., Miesel J., Rogers B.M., Schweitzer J., Shuman J.K., Tepley A.J. Fire as a Fundamental Ecological Process: Research Advances and Frontiers // Journal of Ecology. – 2020. – Vol. 108. – P. 2047-2066. – DOI: 10.1111/1365-2745.13403.
7. Stephens S.L., Westerling A.L., Hurteau M.D., Peery M.Z., Schultz C.A., Thompson S. Fire and Climate Change: Conserving Seasonally Dry Forests Is Still Possible // Frontiers in Ecology and the Environment. – 2020. – Vol. 18. – P. 354-356. – DOI: 10.1002/fee.2218.
8. Иванова Г.А. Зонально-экологические особенности лесных пожаров в сосняках Средней Сибири : дис. ... д-ра биол. наук : 06.03.03. – Красноярск, 2005. – 405 с.
9. Sudachkova N.E., Romanova L.I., Astrakhanseva N.V., Novoselova M.V., Kosov I.V. Stress reactions of Scots pine trees to injuring by ground fire // Contemporary Problems of Ecology. – 2016. – Vol. 9. – P. 608-616. – DOI: 10.1134/S1995425516050152.
10. Bär A., Michaletz S.T., Mayr S. Fire effects on tree physiology // New Phytologist. – 2019. – Vol. 223. – P. 1728-1741. DOI: 10.1111/nph.15871.
11. Kirdyanov A.V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A.A., Prokushkin A.S., Churakova (Sidorova) O.V., Fonti M.V., Büntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // Environmental Research Letters. – 2020. – Vol. 15. – Article 034061. – DOI: 10.1088/1748-9326/ab7469.
12. Knorre A.A., Siegwolf R.T., Kirdyanov A.V., Saurer M., Churakova (Sidorova) O.V., Prokushkin A.S. Fire as a major factor in dynamics of tree-growth and stable $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ variations in larch in the permafrost zone // Forests. – 2022. – Vol. 13. – Article 13050725. – DOI: 10.3390/f13050725.
13. Alexou M., Dimitrakopoulos A. Early physiological consequences of fire as an abiotic stressor in metabolic source and sink of young Brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) // Tree Physiology. – 2014. – Vol. 34. – P. 1388-1398. – DOI: 10.1093/treephys/tpu098.
14. Perrakis D.D., Agee J.K. Seasonal fire effects on mixed-conifer forest structure and ponderosa pine resin properties // Canadian Journal of Forest Research. – 2006. – Vol. 36. – P. 238-253. – DOI: 10.1139/x05-212.
15. Санников С.Н., Санникова Н.С. Эволюционные аспекты пирозкологии светлохвойных пород // Лесоведение. – 2009. – № 3. – С. 3-10.
16. Фуряев В.В., Фуряев Е.А. Пирозкологические свойства сосны обыкновенной в Средней Сибири // Хвойные бореальной зоны. – 2008. – Т. XXV, № 1-2. – С. 103-108.
17. Санникова Н.С., Санников С.Н., Кочубей А.А., Петрова И.В. Естественное возобновление сосны на пожарах в лесостепи Западной Сибири // Сибирский лесной журнал. – 2019. – № 5. – С. 22-29. – DOI: 10.15372/SJFS20190503.
18. Swetnam T.W., Baisan C.H. Historical Fire Regime Patterns in the Southwestern United States since AD 1700 // Fire Effects in Southwestern Forests: Proceedings of the Second La Mesa Fire Symposium. – USDA Forest Service, 1996. – P. 11-32.
19. Taylor A.H., Skinner C.N. Fire History and Landscape Dynamics in a Late-Successional Reserve, Klamath Mountains, California, USA // Forest Ecology and Management. – 1998. – Vol. 111. – P. 285-301.
20. Locosselli G.M., Buckeridge M.S. Dendrobiochemistry, a missing link to further understand carbon allocation during growth and decline of trees // Trees – Structure and Function. – 2017. – Vol. 31. – P. 1745-1758. – DOI: 10.1007/s00468-017-1594-0.

21. Tyutkova E., Loskutov S., Dorzhiev D. Physical and chemical wood characteristics of healthy vs. suppressed Scots pine trees of Central Siberia // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2023. – Vol. 148. – P. 11743-11752. – DOI: 10.1007/s10973-023-12496-4.
22. Николаева С.А., Савчук Д.А., Кузнецов А.С., Тимошок Е.Е. Дендроиндикация прошлых пожаров в верховьях р. Актру (Горный Алтай) // *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 221-243. – DOI: 10.17516/1997-1389-0384.
23. Sutherland E.K., Brown P.M., Falk D.A., Grissino-Mayer H.D., Velasquez E., Woodhouse C.A., Brewer P. Fire History Analysis and Exploration System. Version 2.0 [Электронный ресурс]. – Fire Research and Management Exchange System, FHAES Working Group, 2014. – URL: <http://www.frames.gov/partner-sites/fhaes/fhaes-home/> (дата обращения: 13.05.2026)
24. Grissino-Mayer H.D. Modeling fire interval data from the American Southwest with the Weibull distribution // *International Journal of Wildland Fire*. – 1999. – Vol. 9, No. 1. – P. 37-50.
25. Bigio E.R., Swetnam T.W., Baisan C.H. et al. The influence of land-use activities and regional drought on historical fire regimes of Buryatia, Siberia // *Environmental Research Letters*. – 2022. – Vol. 17, No. 1. – 054043. – DOI: 10.1088/1748-9326/ac6964.
26. Kumar A., Wang L., Dzenis Y.A., Jones D.D., Hanna M.A. Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock // *Biomass and Bioenergy*. – 2008. – Vol. 32. – P. 460-467. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.11.004.
27. Gao M., Sun C., Zhu K. Thermal degradation of wood treated with guanidine compounds in air // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2004. – Vol. 75. – P. 221-232. – DOI: 10.1023/B:JTAN.0000017344.01189.e5.
28. Protásio T.P., Junior M.G., Mirmehdi S., Trugilho P.F., Napoli A., Knovack K.M. Combustion of biomass and charcoal made from babassu nutshell // *Cerne*. – 2017. – Vol. 23, No. 1. – P. 1-10. – DOI: 10.1590/01047760201723012202.
29. Wotton B.M., Gould J.S., McCaw W.L., Cheney N.P., Taylor S.W. Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest // *International Journal of Wildland Fire*. – 2012. – Vol. 21, No. 3. – P. 270-281. – DOI: 10.1071/WF10127.
30. Shapchenkova O.A., Loskutov S.R., Kukavskaya E.A. Alteration of Organic Matter during Wildfires in the Forests of Southern Siberia // *Fire*. – 2023. – Vol. 6, No. 8. – Article 304. – DOI: 10.3390/fire6080304.

© С. В. Жила, Е. А. Артемихина, И. В. Фуряев, 2026

Н. А. Алексеенко^{1,2✉}, И. В. Зацаринный³, К. Н. Гриппа¹

Изучение влияния антропогенной трансформации среды на населения птиц в промышленно освоенных горных районах Арктики с помощью картографического метода

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

²ИГ РАН, г. Москва, Российская Федерация

³Рязанский государственный университет им.С.А.Есенина, г. Рязань, Российская Федерация
e-mail: valtuz@mail.ru

Аннотация. Длительное промышленное освоение Хибинского массива в значительной степени сказалось на экосистеме этой территории, в том числе на представителях орнитофауны – которая является объектом исследования, а предметом – территориальное распределение орнитофауны в условиях антропогенной трансформации. Целью исследования было создание картографических материалов, визуализирующих места обитания различных видов птиц, и анализ их связей с различными видами антропогенной деятельности. В работе использовались картографический, геоинформационный, сравнительный и аналитический методы исследования. Работа базировалась на полевых данных и данных дистанционного зондирования сверх-высокого пространственного разрешения, также были использованы данные ведомственных геопорталов и открытые картографические сервисы. В процессе работы были разработаны и апробированы оригинальные методики создания карт по материалам орнитологических учетов. На их основе были сделаны выводы о приуроченности некоторых видов птиц к конкретным ландшафтам, а также о тяготении разных видов птиц к антропогенно-нарушенным ландшафтам и ненарушенным.

Ключевые слова: маршрутные учеты, население птиц, местообитание, антропогенное влияние

N. A. Alekseenko^{1,2✉}, I. V. Zatsarinny³, K. N. Grippa¹

A study of the impact of anthropogenic environmental transformation on bird populations in industrially developed mountainous regions of the arctic using the cartographic method

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

²IG RAS, Moscow, Russian Federation

³Ryazan State University named after S.A. Yesenin, Ryazan, Russian Federation
e-mail: valtuz@mail.ru

Abstract. Prolonged industrial development of the Khibiny Massif has significantly affected the ecosystem of this territory, including the representatives of the avifauna, which is the object of the study, while the subject is the territorial distribution of the avifauna under conditions of anthropogenic transformation. The aim of the study was to create cartographic materials visualizing the habitats of various bird species and to analyze their connections with different types of anthropogenic activity. The work employed cartographic, geoinformation, comparative, and analytical research methods. The study was based on field data and remote sensing data of ultra-high spatial resolution, as well as data from departmental geoportals and open cartographic services. During the work, original methodologies for creating maps based on

ornithological survey materials were developed and tested. Based on them, conclusions were drawn about the association of certain bird species with specific landscapes, as well as about the tendency of different bird species to gravitate towards anthropogenically disturbed and undisturbed landscapes.

Keywords: route counts, bird population, habitat, anthropogenic impact

Введение

Хибинский горный массив представляет собой сочетание различных природных комплексов северной тайги, осложненных высотной поясностью, и длительного антропогенного влияния, вызванного активным развитием горнодобывающей отрасли с первой половины прошлого века. Комбинация этих факторов создает уникальные для исследования связи между трансформацией ландшафтов и представителями орнитофауны [7,8,9,13].

Птицы могут быть объединены в различные экологические группы в зависимости от их образа жизни. Одна из самых известных классификаций – по биотопу (участку среды с однотипными условиями рельефа, почвы, климат и т. п.), или по-другому, по *месту обитания*. Группа делится на 4 основных типа: лес, открытое пространство, болота и водные пространства, – причем наиболее заселенным является лес, что связано с большим кормовым разнообразием и ярусностью, создающей укрытия и места для гнездования.

Не менее важна классификация *по типу кормления*, так как добыча пищи напрямую связана с приспособленностью вида к местам обитания. Существует 4 *типа передвижения* птиц для добычи корма – лазание, полет, передвижение по земле и плавание, которые также могут подразделяться на несколько типов или несколько из них могут сочетаться у одного и того же вида [3,15].

Антропогенная трансформация ландшафтов заставляет птиц сменять естественные для себя места обитания из-за необратимых изменений окружающей среды, загрязнения или изменения кормовой базы. Тем не менее, человек может быть результатом увеличения численности одних видов и при этом уменьшения других, так как при изменении условий среды аборигенные виды могут заменяться на инвазивные [1,15, 22].

Можно выделить факторы влияния на орнитофауну, которые не образуют как таковых природно-территориальных комплексов, но имеют значительный эффект на различные аспекты жизни птиц. Единой классификации всех факторов влияния нет, но в первую очередь их можно разделить на прямые и косвенные. К прямым можно отнести:

- Непосредственное уничтожение птиц в результате охоты, столкновения с антропогенными объектами (ЛЭП, автомобили, здания) или уничтожения гнёзд.
- Фактор беспокойства.

Косвенные факторы представляют собой опосредованное влияние, в основном через изменение окружающей среды: физическое, различные виды загрязнения, биологические изменения, изменение климата – и в данной работе не рассматриваются [12,14,16].

Цель работы - *определение и анализ мест обитания различных видов птиц, измененных в связи с антропогенной деятельностью*. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Выявление факторов антропогенной трансформации среды на изучаемой территории.
- Создание карт антропогенной трансформации среды.
- Создание карт природно-территориальных комплексов учетных маршрутов.
- Распределение суммарных данных орнитологических учетов по природно-территориальным комплексам.
- Анализ распространения популяции различных видов птиц.

Показатель населения птиц имеет большой вес в оценке экологической составляющей территории, состояние которой сильно зависит от деятельности человека.

Гипотеза исследования предполагала возможность изучения структуры населения птиц в антропогенно преобразованных горных и предгорных районах Хибинского массива посредством картографического анализа.

Методы и материалы

В российской школе орнитологии существует несколько основных методов учета птиц, используемых в зависимости от поставленных задач: площадной (метод картографирования или картирования), маршрутный (линейный), точечный. Однако, стоит понимать, что все они несут в большой степени субъективный характер, так как птицы иногда могут быть крайне динамичным, иногда – очень незаметным объектом среды. В исследованиях всегда присутствует какая-то доля погрешности их оценки. Также важное значение в учете играет характер пребывания птиц на территории – являются ли они оседлыми или зимующими, кочующими или перелетными.

Материалами для данного исследования служат разновременные полевые данные результатов маршрутных учетов птиц по методу Ю. С. Равкина на юго-западный район Хибинского горного массива, полученные И. В. Зацаринным. В процессе прохождения маршрута указывалась его дата, природная зона (и ее приблизительное положение относительно начала маршрута), виды встреченных птиц и их количество. В самой таблице указывалось число встреченных особей (в скобках число встреч), также были дополнительные обозначения: *pr* – пара, ♂ – самец, ♀ – самка, *juv* – птенец, *gn* – обнаружена / вспугнута самка, насиживающая кладку. При обработке данных *pr* считалось за 2 особи, а ♂, ♀ и *gn* за одну, птенцы не учитывались [2,6,10].

Результаты маршрутных учетов значительно зависят от соотношения полосы учета по маршруту и его длины, соответственно при максимальной ширине и длине достоверность будет выше. Также, благодаря значительной площади исследования, в оценке могут быть учтены различные природно-территориальные комплексы, что в некоторых случаях делает результаты более репрезентативными, чем при обходе

одного участка. Процесс учета состоит в определении вида птицы и расстояния до нее на протяжении маршрута, после при проведении обработки полученных данных применяется специальная формула пересчета, благодаря которой можно достаточно точно определить плотность населения птиц [5,11].

Опыт картографирования орнитофауны имеет долгую историю. Орнитологические карты делятся на несколько типов, которые можно в общем виде описать как карты ареалов: границ ареалов, ареалов местонахождения, кадастрово-справочные, стандартных географических сеток, структуры ареалов вида [4].

Объединяет все орнитологические карты отображение информации, в основном, качественных характеристик (распространение видов), иногда могут отображаться количественные характеристики, например, данные о населении птиц. Однако, эта группа карт не имеет единой типологии или системы, так как в зависимости от различных факторов (особенно масштаба исследований) итоговые карты будут значительно отличаться.

Первый этап картографической части работы состоял в создании карты антропогенной нагрузки и выделении биотопов вдоль учетных маршрутов. При этом использовались: карта растительных сообществ Хибинского горного массива [16], данные кадастровой карты портала пространственных данных «Национальная система пространственных данных» (<https://nspd.gov.ru/>), снимки съемочной системы Landsat 8 за ранний весенний и поздний летний период, цифровая модель ArcticDEM, данные OpenStreetMap), данные зимней съемки БПЛА, спутниковые снимки высокого разрешения открытых сервисов (ESRI, Yandex и Google Earth).

Карта антропогенных объектов отображает все объекты, которые могут влиять на население птиц в юго-западном районе Хибинского горного массива: озера площадью более 15 000 м² и реки длиной более 500 м, автомобильные дороги (асфальтированные и грунтовые), железные дороги и ЛЭП, границы населенных пунктов (выделены разные типы застройки), рудники, карьеры, хвостохранилища и обогатительные фабрики, горнолыжные курорты, крупные туристические базы, популярные пешие маршруты. И дополнительно на карту были вынесены границы Хибинского национального парка и Ботанического сада.

Следующим этапом было составление карты основных биотопов вдоль учетных маршрутов в пределах буферных зон:

- 100 м – лесные массивы и крутые безлесные высокогорные склоны.
- 200 м – разреженная лесная растительность, открытые водные пространства и участки застройки.
- 300 м – безлесные участки.

Так как разные виды птиц заселяют определенные типы биотопов, были выделены: березовый лес, елово-березовый лес, смешанный лес, березово-еловый лес, еловый лес, заболоченные участки (слабозалесенные и сильнозалесенные), редколесья и криволесья, тундра (кустарничковая, мохово-лишайниковая и гольцовая), травяно-кустарниковые заросли в районе охранных зон ЛЭП, луговые сообщества, антропогенные объекты [17,18, 19, 20, 21].

Всем выделяемым биотопам присуждалось несколько характеристик: крутизна склона, высота, размер крон, сомкнутость крон и антропогенная нагрузка, которая сильно изменялась в зависимости от расположения объектов и близости к горным разработкам или застройке. Выделялось 3 типа антропогенной нагрузки: низкая, средняя и высокая, дополнительно в скобках указывалось чем она представлена.

Для того, чтобы распределить суммарные количественные характеристики по выделенным биотопам каждого маршрута требовалось выполнить их статистическую обработку. Для этого исходные данные по маршрутам были переведены в табличный формат Excel, на каждом маршруте на основе количества птиц рассчитывалась плотность популяции видов. С созданных карт биотопов была получена информация о суммарной площади учета по маршрутам и доле всех биотопов от общей площади на каждом маршруте. Расчеты выполнялись на языке программирования Python, с использованием библиотек pandas, numpy, seaborn, matplotlib и scipy, с применением коэффициента корреляции Спирмена. Этот метод был выбран из-за его устойчивости к выбросам данных и нелинейной взаимосвязью между площадью биотопов и плотностью птиц.

Для отражения антропогенного воздействия на основе ранее созданной карты вокруг различных типов объектов были созданы различные буферные зоны, которым был присвоен балл антропогенной нагрузки. Задание буферных зон выполнялось комплексно – как на основе имеющихся научных исследований в аналогичных ландшафтах, так и эмпирическим путем, с учетом известных особенностей исследуемой территории. Всего было решено выделено 5 категорий с разным баллом нарушенности. Далее для каждого маршрута по полученным данным рассчитывался средневзвешенный балл антропогенного влияния. Таким образом были получены данные о том, какие маршруты в большей степени подвержены воздействию человека, а какие в меньшей.

В результате ни один маршрут не имеет балл нагрузки ниже 3, следовательно все эти территории можно считать среденарушенными. Есть явно выделяющиеся 3 участка с самой высокой нарушенностью, они проходят в непосредственной близости от территорий горных разработок и практически полностью лежат в зоне максимальной нарушенностью (за исключением небольшой части маршрута «Северный склон горы Юкспорр – Юкспорр – долина Гакмана»).

Далее, на основе средних баллов антропогенной нагрузки и плотности птиц на маршрутах, был рассчитан коэффициент Спирмена, позволяющий оценить приуроченность представителей орнитофауны к территориям с разной степенью трансформации.

Результаты и обсуждение

В результате применения коэффициента корреляции Спирмена для обработки данных орнитологических учетов и биотопов на маршруте была получена таблица данных с рассчитанной вероятностью встречи конкретного вида птиц в определенном биотопе. Помимо числовых значений в матрице также присутствует цветовая шкала, красные оттенки обозначают положительную вероятность встретить вид, синие – отрицательную. Присутствуют также серые ячейки

«0.00», которые в большинстве случаев выделяются из-за крайне низких значений численности и плотности, что особенно заметно по тем видам, у которых нули наблюдаются во всех биотопах, вероятно, эти виды были встречены единично. Часть достоверных значений была проверена на ошибки и вычисленные данные совпали с известной информацией о населении птиц в Хибинах.

Сравнение приуроченности видов к антропогенным объектам, рассчитанную по баллам антропогенной нагрузки, и приуроченность к комплексу антропогенных объектов, рассчитанному по корреляции видов и биотопов, показывает схожие результаты. Так, тяготеющие к человеку виды: ворона серая, зарянка, мухоловка-пеструшка, обыкновенный снегирь, рябинник, домовый воробей и певчий дрозд, – по матрице корреляций имеют значения не менее 0,3, что говорит о высокой приверженности этих видов к антропогенным объектам. В то же время избегающие человека виды: камышовая овсянка, обыкновенная кукушка, зимняк, обыкновенная каменка, хрустан, пуночка, обыкновенная зеленушка, луток, чернозобая гагара, обыкновенная крачка и перевозчик, – наоборот имеют отрицательные значения корреляции к антропогенным объектам (не более -0,19).

Заключение

Таким образом, в ходе работы было проведено исследование возможностей создания картографических материалов по данным маршрутных орнитологических учетов. Разработанный алгоритм с применением коэффициента корреляции Спирмена, а также выявления закономерностей распределения населения птиц на антропогеннонарушенных природных комплексах в районе Кирово-Апатитской агломерации.

Благодарности

Работа выполнена по Госзаданию FMWS-2024-0009 №1023032700199-9 и «Цифровые технологии и методы картографии, геоинформатики и дистанционного зондирования в географических исследованиях», аппаратное и программное обеспечение предоставлены Центром коллективного пользования «Геопортал МГУ»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Быков В. Е. Антропогенное воздействие на лесные экосистемы и гнездящихся птиц // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Том 17. – № 4. – С. 614-623.
2. Витер С. Г. Орнитологические наблюдения в ходе кратковременной экспедиции в юго-восточную часть Хибин // Русский орнитологический журнал. – 2015. – Том 24. – № 1219. – С. 4274-4280.
3. Гудина А. Н. Методы учета гнездящихся птиц. Картирование территорий. Запорожье: Дикое поле. – 1999. – С. 242.
4. Емельянова Л. Г., Огуреева Г. Н. Биogeографическое картографирование: учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, – 2026. – 108 с.
5. Захарова Н. Ю. Количественные методы учета птиц // Вестник МГПУ. Серия: «Естественные науки» – 2014. – Т. 13. – № 1. – С. 42-51.

6. Зацаринный И. В., Грибова М. О., Варюхин В. С. К орнитофауне города Апатиты и его окрестностей (Мурманская область) // Русский орнитологический журнал – 2017. – Т. 26. – № 1520. – С. 4583-4587.
7. Карпачев И. П., Жиров В. К., Загвоздина О. И., Крымская М. М. Эколого-гигиеническая оценка состояния окружающей среды в районе размещения Хибинского горно-химического комплекса Мурманской области // Вестник МГТУ. – 2011. – Т. 14. – № 3. – С. 552-560.
8. Колесников С. Ф., Горбатов Е. С. Анализ ландшафтной структуры Хибин // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2021. – Т. 65. – № 1. – С. 80-89.
9. Лукашов А. А. Геоэкологические проблемы добычи и обогащения апатит-нефелиновых руд в Хибинах // Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории земли. – 2021. – С. 52-60.
10. Наумов Р. Л. Организация и методы учета птиц и вредных грызунов. – Москва: Издательство АН СССР. – 1963. – С. 137.
11. Равкин Ю. С. К методике учета птиц в лесных ландшафтах // Природа очагов клещевого энцефалита на Алтае. — Новосибирск. – 1967. – С. 66–75.
12. Сенатор С. А., Никитин Н. А., Саксонов С. В., Раков Н. С. Факторы, определяющие формирование флоры железных дорог // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 1-1. – С. 261-266.
13. Хибины: природа и человек // Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Кольский научный центр Российской академии наук, Институт проблем промышленной экологии Севера и др. – Санкт-Петербург: Свое издательство. – 2022. – С. 308.
14. Шилин М. Б., Леднова Ю.А., Меньшакова М.Ю., Гайнанова Р.И., Румянцева Р.Е. Взаимодействие птиц с линейными техническими объектами // Известия СПбЛТА. – 2024. – № 247. – С. 154-172.
15. Шилин М. Б., Леднова Ю.А., Меньшакова М.Ю. и др. Птицы в техносфере // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – Т. 0. – № 246. – С. 67-89.
16. Юргенсон П. Б. Роль фактора беспокойства в экологии зверей и птиц // Русский орнитологический журнал. – 2013. – Том 22. - № 891. – С. 1683-1689.
17. Akresh M.E., McInvale S.L., King D.I. A meta-analysis of edge effects on nesting success in forest and shrubland birds of eastern North America // Journal of Field Ornithology. – 2024. – Vol. 95.
18. Benítez-López Ana, Alkemade Rob, Verweij P.A. The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: A meta-analysis // Biological Conservation. – 2010. – Vol. 143. – P. 1307-1316.
19. Bicudo Thiago, Anciães Marina, Arregui Lucia, Gil Diego Effects of Forest Fragmentation on Feather Corticosterone Levels in an Amazonian Avian Community // International Journal of Ornithology. – 2020. – Vol. 67. – P. 229-245.
20. Gao M., Guo Y. Bird mortality at tailings ponds: possible threats and solutions, with a particular focus on East Asia // Forktail. – 2019. – Vol. 35. – P. 43-49.
21. Hawkes Virgil C., Hentze Nathan, Gerwing Travis G. Trends in avian use of reclaimed boreal forest habitat in Canada's oil sands // Avian Conservation and Ecology. – 2021. – Vol. 16. – P. 5-45.
22. Morelli F., Beim M., Jerzak L. et al. Can roads, railways and related structures have positive effects on birds? – A review // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2014. – Vol. 30. – P. 21-31.

© Н. А. Алексеенко, И. В. Зацаринный, К. Н. Гринпа, 2026

И. В. Васильцова¹✉, И.О. Исмагилова¹, Л.Ю. Гуленков¹, Ю.И. Коваль²

Содержание кислоторастворимых форм тяжёлых металлов в почвах г. Новосибирска

¹Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный педагогический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: indikator07@mail.ru

Аннотация. В ходе работы был осуществлен отбор проб почв с двух горизонтов (0-5 см) и (5-20 см). Пробные площадки располагались в правобережной части г. Новосибирска. В отобранных пробах почвы с помощью вольтамперометрического метода анализа определяли содержание тяжелых металлов: цинка, кадмия, свинца и меди, установлен водородный показатель почв. Во всех растворах почвах обнаружена нейтральная среда, что препятствует миграции металлов между разными горизонтами. Выявлены статистические отличия по содержанию тяжелых металлов между разными горизонтами почвы. Наибольшие концентрации цинка, свинца и меди обнаружены в верхнем слое почвы. Превышения регионального фона выявлены по лишь по содержанию свинца в поверхностном слое почвы, остальные показатели соответствуют фоновым значениями. Превышения предельно допустимых концентраций установлено не было.

Ключевые слова: тяжелые металлы; кислоторастворимые формы; цинк; кадмий; свинец; медь

I. V. Vasiltsova¹✉, I. O. Ismagilova¹, L. Yu. Gulenkov¹, Y. I. Koval²

Content of acid-soluble heavy metals in soils

¹Siberian State University of Engineering and Biotechnology,
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: indikator07@mail.ru

Abstract. During this study, urban soil samples were collected from two horizons (0-5 cm) and (5-20 cm). The sample plots were located in the right-bank part of Novosibirsk. The heavy metal content of zinc, cadmium, lead, and copper was determined in the collected soil samples using voltammetric analysis, and the pH of the soils was determined. All soil solutions were neutral, preventing metal migration between different horizons. Statistical differences in heavy metal content were found between different soil horizons. The highest concentrations of zinc, lead, and copper were found in the topsoil, while the subsoil had lower concentrations of heavy metals. Only lead in the surface soil exceeded the regional background level; other parameters were within the background range. No exceedances of maximum permissible concentrations were detected.

Keywords: heavy metals; acid-soluble forms; zinc; cadmium; cuprum; plumbum

Введение

Законодательством Российской Федерации закреплено право каждого человека на благоприятную окружающую среду [1]. Почва, как компонент окружающей среды, является определяющим условием существования экосистемы и благополучия человека [2]. Соответственно, анализ качества почв необходим для реализации законодательства и обеспечения экологической безопасности населения [3].

Почва выступает в качестве аккумулятора тяжелых металлов, попадающих в неё как из атмосферного воздуха, так и из поверхностных и подземных вод [4]. Буферные свойства почвы при ее нерациональном использовании могут быть подвержены истощению, что в конечном счете будет способствовать деградации почвенного покрова [5, 6].

В урбанизированной среде Новосибирска почвы подвержены сильному антропогенному воздействию в результате интенсивного автомобильного трафика, работы предприятий топливно-энергетического комплекса, а также промышленных предприятий металлургической и химической отрасли. Как следствие, в последние годы (2023-2024) наблюдается ухудшение гигиенического и санитарно-химического состояния почв в Новосибирске [7, 8].

Тяжелые металлы попадают в урбоземы не только вследствие антропогенной деятельности, но и по природным причинам: составу материнских пород, вымывания и выветривания открытых пород, миграции вулканической пыли [4,9].

В верхнем горизонте почв (0-5 см) активно аккумулируются кислоторастворимые формы тяжелых металлов из-за содержания гумуса, обладающего высокой депонирующей способностью. Гумусовые кислоты образуют с тяжелыми металлами комплексные соединения, которые характеризуются малоподвижностью [10, 11, 12]. При этом в нижнем горизонте (5-20 см), согласно многочисленным исследованиям, концентрация тяжелых металлов достоверно ниже, даже при длительном воздействии. Исключение составляют закисленные почвы ($pH < 6$), где формируются подвижные формы тяжелых металлов, способные к активной миграции [13, 14].

Цель работы: установить содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в верхнем (0-5 см) и нижнем (5-20) горизонтах почвы.

Методы и материалы

Для исследования были выбраны три пробные площадки, располагающиеся на территории г. Новосибирска, условно отличающиеся по степени антропогенного воздействия:

1. Заельцовский бор (55.052834, 82.829861);
2. ПККО «Березовая роща» (55.047235, 82.952802);
3. Красный проспект (55.059340, 82.912264).

Сбор исследуемых образцов почвы проводился в третьей декаде июня 2025 года на пробных площадках 10×10 м методом конверта, посредством снятия верхнего (0 – 5 см), а затем нижнего слоя почвы (5 – 20 см) [15].

Исходные образцы почвы высушивали до постоянной массы, удаляли механические примеси и пропускали через сито с диаметром ячеек 1 мм. Обработанную навеску воздушно-сухой пробы ($5,00 \pm 0,01$ г) помещали в химический стакан емкостью 200–300 см³. С помощью мерного цилиндра к навески приливали 50,0 см³ азотной кислоты (1 моль/дм³), получая соотношение проба : кислота = 1 : 10. Смесь перемешивали круговыми движениями, полученную суспензию встряхивали на ротаторе на протяжении 1 часа и оставляли на сутки в плотно закрытой колбе для настаивания.

Через сутки полученную пробу фильтровали через складчатый фильтр, заранее промытый азотной кислотой (1 моль/дм³) в мерную колбу объемом 50 см³. Во время фильтрования проба перемешивается и переносится на фильтр по возможности полностью. Затем объем полученного фильтрата доводили до метки 50 см³ бидистиллированной водой [16].

Содержание тяжелых металлов устанавливали методом инверсионной вольтамперометрии по стандартной методике ПНД Ф 16.1:2:2:2:3.48-06 [14]. Исследование проб проводили на анализаторе «ТА-07», подключенном совместно с ПК. Каждый образец исследовали в 3-кратной повторности, полученные результаты обрабатывали с помощью методов вариационной статистики программным обеспечением Excel.

Кислотность почв определяли при помощи настольного рН-метра HI2210 с автоматической калибровкой [17].

Результаты

Кислотность всех образцов установлена в пределах 6,8–7,0, что соответствует нейтральной среде.

На рис. 1–3 представлено содержание тяжелых металлов в различных горизонтах почвы. Максимальное содержание цинка обнаружено в верхнем слое почвы 1 пробной площадки. Разница в концентрациях металла, обнаруженных в верхнем и нижнем слоях опытной площадки Заельцовского бора составила 4,3 раза ($p < 0.001$).

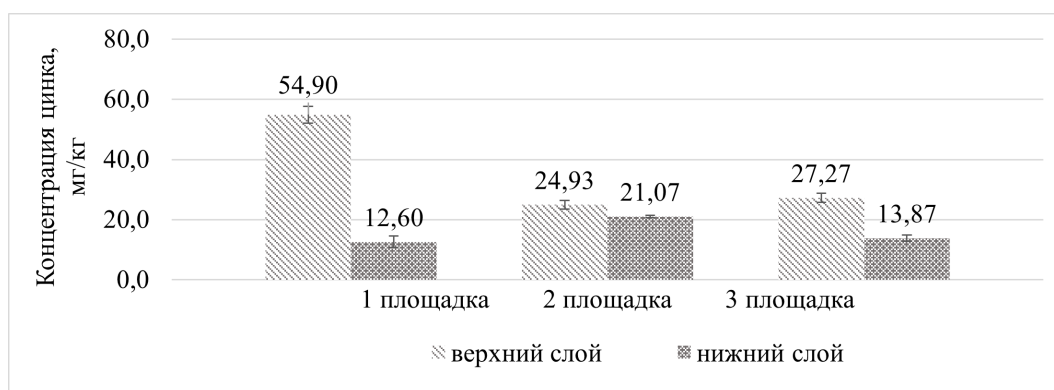


Рис. 1. Содержание цинка в почве, мг/кг

Аналогичная закономерность установлена и на остальных пробных площадках. Концентрации цинка на 3 площадке в верхнем слое почвы в 2 раза выше ($p < 0.01$), чем в нижнем слое. На 2 площадке в поверхностном слое почвы содержание цинка имеет тенденцию к более высокому содержанию, чем в глубинном слое.

Наибольшая концентрация свинца обнаружен в верхнем слое почвы 2 пробной площадки, где его содержание в 3,5 раза превышает значение нижнего слоя ($p < 0.001$). Подобная зависимость в содержании свинца относительно горизонта обнаруживается на всех пробных площадках. В частности, содержание свинца в поверхностном слое 1 площадки в 2,95 раза больше, чем в глубоком слое ($p < 0.01$), в поверхностном слое 3 пробной площадки данный показатель превысил в 2 раза ($p < 0.01$).

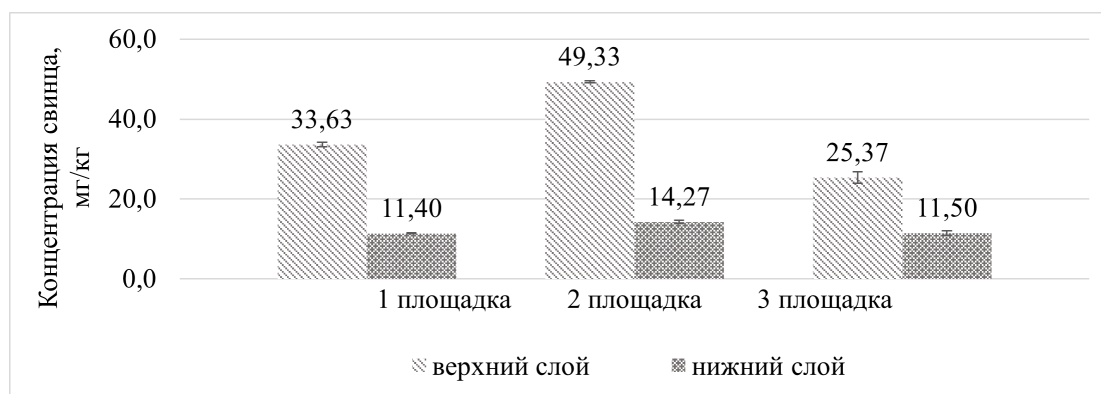


Рис. 2. Содержание свинца в почве, мг/кг

В ходе анализа было обнаружено наибольшее содержание меди на 3 площадке в верхнем слое, где концентрация превышает нижний слой в 3,3 раза ($p < 0.05$). На 2 площадке наблюдается сходная ситуация, концентрация меди в верхнем слое в 5,3 раза выше ($p < 0.05$), чем в нижнем. Противоположная зависимость зафиксирована на 1 площадке, где содержание меди выявлено больше в нижнем слое почвы.

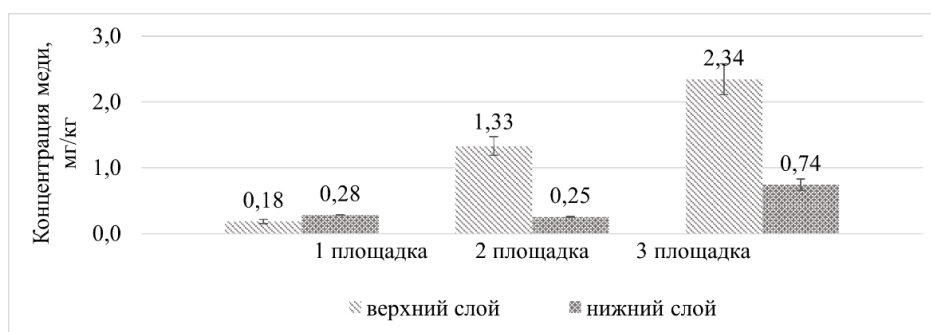


Рис. 3. Содержание меди в двух слоях почвы

Обсуждение

Министерство природных ресурсов и экологии осуществляет регулярный мониторинг почв на установление концентрации кислоторастворимых форм тяжелых металлов. Отбор проб осуществляется на удалении от городов и крупных промышленных предприятий, поэтому полученные значения представляют фон для Западной Сибири. В табл. 1 представлено содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в почвах Западной Сибири [18].

Таблица 1. Содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в почвах Западной Сибири

		Местоположение				Среднее по Западной Сибири
		Кемерово	Новокузнецк	Новосибирск	Томск	
Концентрация металлов, мг/кг	Cu	20,1	22,4	26	17,1	21,4
	Cd	0,44	0,27	0,52	0,34	0,3925
	Pb	16,02	16	7,08	12,3	12,85
	Zn	57,8	62,4	119	63,5	75,675

Кислоторастворимые формы кадмия на исследуемых пробных площадках обнаружены не были, вероятно их содержание остается ниже порога обнаружения, что соответствует низкой фоновой концентрации данного тяжелого металла в почвах Западной Сибири.

Содержание кислоторастворимых форм цинка и меди на пробных площадках не превышает фоновые значения для Западной Сибири. Тем не менее, статистически значимая разница между верхним и нижним слоями может свидетельствовать о дополнительном внесении цинка и меди в городские почвы в ходе антропогенной деятельности, поскольку миграция тяжелых металлов между разными горизонтами нейтральных почв ограничена.

Кислоторастворимые формы свинца присутствуют в нижнем горизонте почвы в близких с фоновыми значениями количествах, явные отклонения отсутствуют, незначительное превышение средней для региона концентрации обнаружены на 2 пробной площадке, где содержание свинца в нижнем слое составило 14,27 мг/кг. При

этом зафиксированы существенные превышения фоновых значений кислоторастворимых форм свинца в верхнем почвенном горизонте, где отклонения от средней фоновой концентрации данного металла в Западной Сибири составляет от 1,9 до 3,8 раз.

Некоторые авторы [9] используют для оценки загрязнения почв показатели ПДС (предельно-допустимое содержание), установленные Чулджиян Х. (табл. 2) [19].

Таблица 2. Предельно допустимые содержания (ПДС) тяжелых металлов в почвах

Тяжелый металл	Zn	Cd	Pb	Cu
ПДС, мг/кг	60	1	60	50

Превышение предельно допустимых содержаний среди исследованных проб выявлено не было. Все тяжелые металлы содержатся в пределах установленной нормы.

Заключение

Нижний горизонт почвы (5-20 см) на всех пробных площадках содержит меньше цинка, свинца и меди, чем верхний горизонт (0-5 см). Исключение составили показатели меди на 1 площадке, где не установлено статистически значимых различий между горизонтами.

Верхний горизонт отличается достоверно более высоким содержанием меди, цинка и свинца, что, вероятно, свидетельствует об искусственном внесении данных металлов в почвы в ходе антропогенной деятельности.

Нейтральная среда в почвах города Новосибирска создает благоприятные условия для накопления тяжелых металлов в верхнем слое урбозема, где они могут связываться с гуминовыми веществами, миграция тяжелых металлов в глубокие слои затруднена.

Разница между нижним и верхним горизонтами почв по концентрации тяжелых металлов может рассматриваться в качестве следа антропогенной деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российская Федерация. Конституция. Конституция Российской Федерации: с изменениями, одобренными общероссийским голосованием 1 июля 2020 года: принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 года // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28399/ (дата обращения 24.03.2026)
2. Healthy soil for healthy humans and a healthy planet / P. M. Kopittke B. Minasny E. Pendall [и др]. – Текст: электронный // Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2018. – Vol. 54. – P. 210-221. – URL: <https://www.tandfonline.com/journals/best20> (дата обращения 24.03.26)
3. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды: Федеральный закон №7-ФЗ: текст. С изм. и доп. от 01 марта 2026 г. [Принят https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/ Гос. Думой 20 декабря 2001 г.: Одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 г.]/ КонсультантПлюс. URL: (дата обращения 27.03.2026)
4. Nieder R., Benbi D.K. Potentially toxic elements in the environment – a review of sources, sinks, pathways and mitigation measures / R. Nieder, D.K. Benbi // Reviews on Environmental

Health, 2024. – Vol. 54(3). – P. 561-575. – URL: <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0161> (дата обращения 02.04.2026)

5. Трифонова Т.А. Тяжелые металлы в почвах различных функциональных зон урбанизированных территорий: оценка содержания и экологического риска / Т.А. Трифонова, И.Н. Курочкин, Ю.Н. Курбатов // Теоретическая и прикладная экология, 2023. – №2. – С. 38-46. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-2-038-046.

6. Тяжелые металлы в городских почвах Приволжского округа: сопряженный анализ официальных данных / Т.А. Парамонова, Г.М. Черногаева, Н.Н. Лукьянова, М.С. Парамонов // Почвоведение, 2023. – №11. – С. 1472-1488. DOI: 10.31857/S0032180X23600300

7. О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2023 году / Министерство природных ресурсов и экологии Новосибирской области – Новосибирск, 2024. – 201 с. – Текст: электронный. – URL: <https://mpr.nso.ru/> (дата обращения 03.04.2026)

8. О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2024 году / Министерство природных ресурсов и экологии Новосибирской области – Новосибирск, 2025. – 204 с. – Текст: электронный. – URL: <https://mpr.nso.ru/> (дата обращения 03.04.2026)

9. Плеханова И.О. Экологическое нормирование состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами/ И.О. Плеханова, О.А. Золотарева// Агрохимия, 2020. - №10. - С.79-88

10. Бородина Н.А. Оценка техногенного загрязнения по содержанию кислоторастворимых форм тяжелых металлов в урбанизированных почвах города Свободного (Амурского края) / Н.А. Бородина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. – №1(4). – С. 1055-1058.

11. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение / В. Б. Ильин. – Новосибирск: Наука, 1991. – 151 с.

12. Чимитдоржиева Г.Д. Тяжелые металлы в почвах степных экосистем Западного Забайкалья / Г.Д. Чимитдоржиева, Е.А. Бодеева, Э.О. Чимитдоржиева // Аридные экосистемы, 2022. – №2(91). – С. 62-70. DOI: 10.24412/1993-3916-2022-2-62-70.

13. Copper and zinc accumulation and fractionation in a clayey Hapludox soil subject to long-term pig slurry application / T.A. Formentini, F. J. Kochem Mallmann, A. Pinheiro [и др]. – Текст: электронный// Science of The Total Environment, 2025. – Vol. 536. – P. 831-839 – URL: <https://www.sciencedirect.com/> (дата обращения 08.04.2026)

14. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: межгосударственный стандарт: введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 апреля 2018 г. № 202-ст. – Москва, 2018. – 16 с.

15. Медведев И.Ф. Тяжелые металлы в экосистемах (монография)/ И.Ф. Медведев, С.С. Деревягин – Саратов: «Ракурс», 2017. - 178с.

16. ПНД Ф 16.1:2:2:2:3.48-06 Количественный химический анализ проб почв, тепличных грунтов, илов, донных отложений, сапропелей, твердых отходов: методика выполнения измерений массовых концентраций цинка, кадмия, свинца, меди, марганца, мышьяка, ртути методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА / разработ. ФГУ «Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия»; утв. ООО НПП «Томьаналит». – Томск, 2005. – 44 с.

17. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки: межгосударственный стандарт : введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 8 февраля 1985 г. № 283. – Москва, 1985. – 6 с.

18. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2023 году. Ежегодник / ИПМ ФГБУ «НПО «Тайфун». – Обнинск, 2024. – 121 с.

19. Чулджиян Х. Тяжелые металлы в почвах и растениях / Х. Чулджиян, С. Корвета, З. Фацек // Экологическая конференция. – Братислава, 1988. – № 1. – С. 5-24.

© И. В. Васильцова, И. О. Исмаилова, Л. Ю. Гуленков, Ю. И. Коваль, 2026

Т. О. Перемитина^{1,2✉}, И. Г. Яценко¹

Спутниковая оценка восстановления экосистемы после аварийного разлива нефтепродуктов в Арктической зоне

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии нефти
Сибирского отделения Российской академии наук (ИХН СО РАН),

г. Томск, Российская Федерация

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР),

г. Томск, Российская Федерация

e-mail: peremitinat@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ восстановления экосистемы в Арктической зоне после чрезвычайной ситуации, связанной с аварийным разливом нефтепродуктов. Исследования проведены в районе посёлка Тухард Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района Красноярского края. Цель работы заключалась в анализе пространственно-временной динамики состояния растительного покрова по значениям вегетационного индекса NDVI. Для анализа были выделены три участка мониторинга, расположенные выше по течению, в зоне аварии и ниже по течению относительно направления миграции загрязнения. В качестве исходных данных использованы спутниковые материалы MODIS за период 2018–2024 гг., обработанные в системе ВЕГА-Science. Сравнительный анализ временных рядов NDVI показал, что на фоновом участке значения индекса оставались наиболее высокими, тогда как в зоне аварийного воздействия и ниже по течению наблюдалось его снижение, особенно в 2020 г. В 2024 г. отмечена частичная положительная динамика, что может свидетельствовать о постепенном восстановлении растительного покрова, однако значения индекса в зоне негативного воздействия по-прежнему ниже фоновых.

Ключевые слова: Арктическая зона, разлив нефтепродуктов, NDVI, ВЕГА-Science, дистанционное зондирование

T. O. Peremitina^{1,2✉}, I. G. Yashchenko¹

Satellite assessment of ecosystem recovery after an emergency oil spill in the Arctic zone

¹Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tomsk, Russian Federation

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation
e-mail: peremitinat@mail.ru

Abstract. An analysis of ecosystem recovery in the Arctic Zone after an emergency caused by an accidental oil product spill was conducted. The study was carried out in the area of the settlement of Tukhard, in the Taimyr Dolgano-Nenets Municipal District of Krasnoyarsk Krai. The aim of the work was to analyze the spatiotemporal dynamics of vegetation cover condition using NDVI values. Three monitoring sites were selected for the analysis: upstream, in the accident zone, and downstream relative to the direction of contaminant migration. Satellite MODIS data for the period 2018–2024, processed in the VEGA-Science system, were used as the source data. A comparative analysis of NDVI time series showed that the background site had the highest index values, whereas a decrease was observed in the accident-affected zone and downstream, especially in 2020. By 2024, partial positive

dynamics were noted, which may indicate gradual recovery of the vegetation cover; however, NDVI values in the affected zone remained below background levels.

Keywords: Arctic Zone, oil spill, NDVI, VEGA-Science, remote sensing

Введение

Аварийные разливы нефтепродуктов в Арктической зоне представляют собой одну из наиболее опасных форм техногенного воздействия на природную среду. В условиях Крайнего Севера даже сравнительно локальные инциденты способны вызывать длительные нарушения состояния водных и наземных экосистем, поскольку процессы самоочищения и естественного восстановления здесь протекают медленно.

Как отмечено в работе [1], экосистемы арктических территорий намного дольше восстанавливаются после негативных воздействий, т.к. все восстановительные процессы протекают медленнее. Для мониторинговых наблюдений длительных восстановительных процессов экосистем арктических территорий максимально подходят методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). ДЗЗ помогают регулярно получать данные о состоянии растительного покрова, одного из индикаторов состояния экосистемы. Значения нормализованного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) позволяет количественно оценить состояние растительного покрова. Индекс принимает значения от -1 до 1, чем ближе значение индекса к 1, тем лучше отражательная способность растительного покрова, а значит и его состояние.

Целью настоящей работы является исследование пространственно-временной динамики состояния арктической экосистемы в зоне аварийного разлива нефтепродуктов на основе спутниковых данных и индекса NDVI.

Объект исследования

Объектом исследования является территория аварийного разлива нефтепродуктов, произошедшего 12 июля 2020 г. в районе посёлка Тухард Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района Красноярского края. Загрязнение распространилось по ручью в сторону двух озёр, расположенных в пределах слабодренированного северного ландшафта [2].

Для оценки восстановления природной среды в системе ВЕГА-Science [3] были выделены три участка мониторинга, расположенные последовательно вдоль направления распространения загрязнения: фоновая зона выше по течению, пункт аварии и участок ниже по течению, вблизи зоны озёр (рис. 1). Такое размещение позволяет сопоставить исходное состояние территории, при воздействии нефтеразлива и последствия изменений в зоне переноса загрязнения.



Рис. 1. Исследуемая территория

Участки расположены линейно по гидрологическому потоку: участок 1 – контрольная зона выше эпицентра, участок 2 – непосредственный источник аварии, участок 3 – зона миграции загрязнителя вниз по течению. Интервал между ними составляет около 0,8-1 км, что обеспечивает градиентное отслеживание воздействия.

Методы и материалы

Для оценки состояния территории использованы спутниковые данные MODIS с пространственным разрешением 250 м с недельной временной дискретизацией.

Анализ основан на изучении динамики значений вегетационного индекса NDVI, рассчитанного для трёх выделенных участков за период 2018–2024 гг. В исследование были включены периоды вегетации (с июня по сентябрь) с 2018 г., предшествующего разливу нефтепродуктов, 2020 г. - период аварии и последующие 2022-2024 гг. - периоды восстановления растительного покрова. Все расчёты выполнялись в системе BEGA-Science. Полученные результаты позволили сопоставить значения индекса NDVI на трёх исследуемых участках (рис.1).

Такой подход дал возможность проследить изменение состояния растительного покрова в зоне разлива, оценить степень его нарушения и охарактеризовать особенности восстановления территории после аварии.

Результаты и обсуждение

Для оценки пространственно-временной динамики состояния растительного покрова были рассчитаны средние значения NDVI за 25–37-ю недели года,

соответствующие периоду с 17 июня по 15 сентября, для трёх указанных участков с 2018 по 2024 гг. На рис. 2 представлена динамика изменения индекса NDVI за указанный период.

Выбор именно этого временного интервала летнего сезона обусловлен тем, что он охватывает основной вегетационный период в арктических условиях и позволяет сопоставлять значения NDVI в фазу наиболее активного развития растительного покрова. Использование средних значений за 7 дней в системе ВЕГА-Science обеспечивает сглаживание кратковременных колебаний, связанных с облачностью и атмосферными влияниями [3]. В результате временные ряды становятся более устойчивыми и удобными для межгодового сравнения.

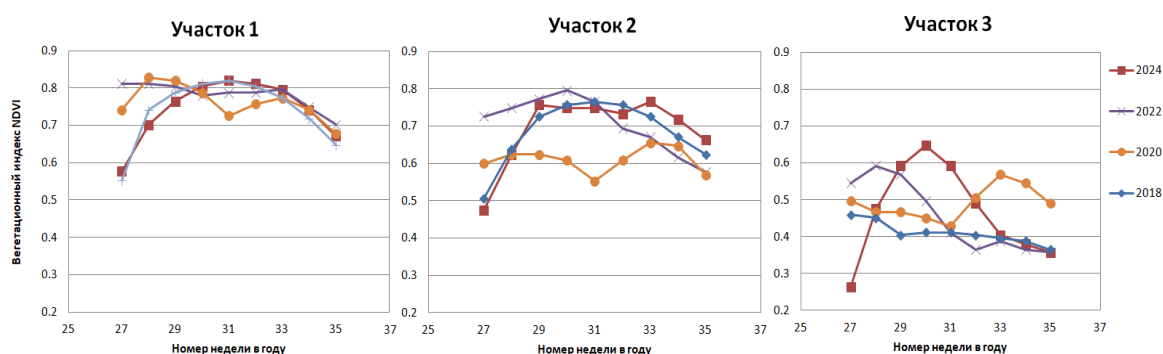


Рис. 2. Динамика изменения значений индекса NDVI в 2018 - 2024 гг.

Сравнение графиков (рис. 2) показывает выраженную пространственную неоднородность состояния растительного покрова на исследуемой территории. Наибольшие значения NDVI устойчиво фиксируются на участке 1, который является фоновой зоной с минимальной степенью техногенного воздействия. На участке 2, соответствующий месту аварии, наблюдается снижение индекса в 2020 г. по сравнению с 2018, 2022 и 2024 гг., что отражает влияние аварийного разлива на состояние растительности. Наиболее низкие значения NDVI характерны для участка 3, расположенного ниже по течению, что указывает на более сильную деградацию растительного покрова в зоне переноса загрязнения по гидрологическому пути.

Сопоставление временной динамики также подтверждает различия между исследуемыми участками. На участке 1 значения NDVI сохраняются на высоком уровне во все годы и демонстрируют преимущественно сезонный характер изменений, связанный с естественным развитием растительности в летний период.

Заключение

Проведенный анализ динамики вегетационного индекса NDVI помог получить два важных вывода: во-первых, насколько нарушен растительный покров, а во-вторых, как именно он восстанавливается после разлива нефтепродуктов. Сравнительный анализ временных рядов NDVI показал, что на фоновом участке значения индекса оставались наиболее высокими, тогда как в зоне аварийного

воздействия и ниже по течению наблюдалось его снижение, особенно в 2020 г. В 2024 г. отмечена положительная динамика, что может свидетельствовать о постепенном восстановлении растительного покрова, однако значения индекса в зоне негативного воздействия по-прежнему ниже фоновых.

Полученные результаты показывают, что сервис «ВЕГА» позволяет получить дистанционную оценку экосистем труднодоступных арктических территорий. ДЗЗ позволяют выявлять зоны техногенного воздействия, отслеживать динамику растительного покрова, а также оценивать результативность рекультивационных мероприятий.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР 126012716057-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гурлев И. В., Макоско А. А., Малыгин И. Г. Экологические проблемы Арктической зоны России на примере Ямало-Ненецкого автономного округа // Арктика: экология и экономика. – 2024. – Т. 14, № 3(55). – С. 370-383.
2. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году» [Электронный ресурс]. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/5304> (дата обращения: 17.04.2026).
3. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Толпин В. А. Система «ВЕГА-Science»: возможности работы с данными спутниковых наблюдений Земли для решения научных и прикладных задач // Земля и Вселенная. – 2025. – № 1-2(361–362). – С. 66-85.

© Т. О. Перемитина, И. Г. Яценко, 2026

Г. А. Иванова^{1✉}, В. А. Иванов^{1,2}, Е. А. Кукавская¹, П. Д. Третьяков¹

Мониторинг воздействия пожаров разной интенсивности на древостой сосняков Средней Сибири

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет науки и технологий,
г. Красноярск, Российская Федерация
e-mail: gaivanova@ksc.krasn.ru

Аннотация. Проведены исследования и мониторинг воздействия низовых пожаров разной интенсивности на древостой в сосняках кустарничково-лишайниково-зеленомошных Средней Сибири. Рассмотрены факторы, влияющие на послепожарный отпад деревьев в сосняках после воздействия пожаров разной интенсивности. Выявлена тесная связь величины послепожарного отпада деревьев с интенсивностью и скоростью распространения пожара, глубиной прогорания и сгоревшим запасом лесных горючих материалов, а также с факторами, влияющими на высыхание лесных горючих материалов и возможность их горения, а также на интенсивность пожара. Применение множественного регрессионного анализа позволило оценить степень влияния факторов среды и интенсивности пожара на послепожарный отпад деревьев в сосняках.

Ключевые слова: лесной пожар, отпад деревьев, сосняки, Средняя Сибирь

G. A. Ivanova^{1✉}, V. A. Ivanov^{1,2}, E. A. Kukavskaya¹, P. D. Tretyakov¹

Monitoring the impact of fires of varying intensity on stands of pine forests in Central Siberia

¹V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

²Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation
e-mail: gaivanova@ksc.krasn.ru

Annotation. Studies and monitoring of the impact of fires of varying intensity on the stands of pine forests in Central Siberia have been carried out. The factors influencing the post-fire trees mortality in pine forests after exposure to fires of varying intensity are considered. A close relationship has been revealed between the post-fire loss of trees and the intensity and speed of fire spread, the depth of burning and the burnt reserve of forest combustible materials, as well as with factors affecting the drying of forest combustible materials and the possibility of their burning, as well as the intensity of the fire. The use of multiple regression analysis made it possible to assess the degree of influence of environmental factors and fire intensity on the post-fire loss of trees in pine forests.

Keywords: forest fire, falling trees, pine forests, Central Siberia

Введение

Важную роль лесных пожаров в формировании растительности Сибири неоднократно отмечали многие исследователи [1 - 4]. На степень повреждения древостоя при пожаре и последующий отпад деревьев оказывают влияние целый ряд

экологических, орографических и климатических факторов [5 - 12], также влияет сила и тип пожара, породный состав, возраст и полнота насаждения, крутизна склона, ветер [13]. В тоже время, исследователи неоднократно отмечали высокую устойчивость сосны к воздействию пожаров [5, 14, 15].

Целью наших исследований являлась оценка воздействия пожаров на древостой и послепожарный отпад деревьев в южнотаежных и среднетаежных сосняках Средней Сибири.

Методы и материалы

Исследования по оценке воздействия пожаров на древостой проводили, в среднетаежных сосняках, произрастающих в бассейне реки Тугулан (60°38' с.ш., 89°41' в.д.) и в южнотаежных сосняках Нижнего Приангарья (58°35' с.ш., 98°55' в.д.). Сосняки кустарничково-лишайниково-зеленомошного типа леса на участках, площадью по 4 га каждый, были пройдены пожарами разной интенсивности [16].

Учет послепожарного отпада деревьев проводили по методике, в основу которой положен метод квадратов, исходящих из одной центральной точки [17]. На каждом участке оценивалось состояние не менее 100 деревьев диаметром 10 см и более. До пожара у выбранного дерева измеряли высоту, диаметр на высоте 1.3 м, высоту до живой части кроны, а также степень заселенности насекомыми. После пожара оценивали высоту нагара на стволе, состояние кроны дерева, наличие пожарной подсушины и обгорание корневых лап. Послепожарный отпад деревьев оценивали по количеству отпавших деревьев в % от общего числа живых деревьев до пожара. Мониторинг отпада деревьев на участках в сосняках проводили в течение 14 лет после пожара.

Результаты

В результате мониторинга, установлено, что через 10 лет в среднетаежных сосняках кустарничково-лишайниково-зеленомошных после пожаров высокой интенсивности отпад деревьев в древостое составил 89,3 %, средней - до 19,4%, низкой – до 11,8% от числа живых деревьев до пожара (табл. 1). В южнотаежных сосняках кустарничково-лишайниково-зеленомошных величина отпада деревьев составила после высокоинтенсивного пожара - 71.1%, среднеинтенсивного – 14.9% от числа живых деревьев до пожара. После низкоинтенсивных пожаров в сосняках отпад деревьев варьировал – от 6.4 до 9.8%. Выявлено, что основной отпад деревьев в сосновых насаждениях происходит в первые три года после пожара.

Таблица 1. Динамика отпада деревьев после пожаров разной интенсивности в сосняках лишайниково-зеленомошных

№№ п/п	Интенсивность пожара	Период после пожара, лет		
		3	7	10 и более
Среднетаежные сосняки				
1	высокая	88.1	89.3	89.3
2	средняя	7.3 - 14.3	8.3 - 16.3	10.4 - 19.4
3	низкая	4.3 - 8.2	4.8 - 10.6	5.3 - 11.8
Южнотаежные сосняки				
4	высокая	70.1	71.1	71.1
5	средняя	14.3	14.3	14.9
6	низкая	4.2 - 5.4	6.4 - 8.7	6.4 - 9.8

Примечание: Отпад деревьев приведен в % от числа живых деревьев до пожара.

Пожары с интенсивностью пожара до 2000 кВт/м отнесены к низкоинтенсивным, от 2001 до 4000 кВт/м - к среднеинтенсивным и более 4000 кВт/м - к высокоинтенсивным [18].

Обсуждение

При пожарах разной интенсивности в сосняках температура при сгорании ЛГМ на поверхности коры ствола в комлевой части дерева достигала 627–732°C, температура под корой дерева в зоне камбия и флоэмы при прохождении кромки огня поднималась от 294 до 486°C в течение 3–4 минут. И после прохождения кромки огня снижение температуры до 50°C продолжалось в течение 5–6 минут [16]. Таким образом, живые ткани ствола подвергались воздействию температур свыше 50°C более 8–10 мин, что по данным Г.И. Гирс [19] вызывает гибель камбия.

В южнотаежных сосняках кустарничково-лишайниково-зеленомошных опал кроны и повреждение хвои разной степени зафиксировано у 98% деревьев при пожарах средней и высокой интенсивности. Повреждение камбия разной степени отмечено у 96 % деревьев при высокоинтенсивном пожаре, у 79 % при среднеинтенсивном и у 34% при низкоинтенсивном пожаре. Установлено наличие связи отпада деревьев после воздействия пожаров низкой и средней интенсивности от их диаметра (коэффициент корреляции 0,88).

Помимо воздействия высоких температур, величина послепожарного отпада деревьев в светлохвойных насаждениях определяется комплексом факторов и параметрами пожара, в числе которых интенсивность пожара, скорость распространения фронта пожара, глубина прогорания и сгоревший запас напочвенных лесных горючих материалов (ЛГМ), запас живого напочвенного покрова. Также имеются факторы, влияющие на высыхание напочвенных горючих материалов и, соответственно, на их сгорание, такие как влажность и температура воздуха, осадки, учитываемые при расчете комплексного показателя пожарной опасности по условиям погоды ПВ-1.

Проведение множественного регрессионного анализа позволило оценить степень влияния вышеприведенных факторов на древостой и на величину отпада деревьев после пожара в сосняках. В таблице 2 приведены коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости количества отпада деревьев в сосняках после пирогенного воздействия в зависимости от интенсивности и скорости распространения фронта пожара, от глубины прогорания и сгоревшего запаса ЛГМ, которые непосредственно влияют на отпад деревьев.

Таблица 2. Связь количества послепожарного отпада деревьев с параметрами лесного пожара в сосняках

№ п/п	Факторы	Коэффициент корреляции
1	Интенсивность пожара, кВт/м	0,90
2	Скорость распространения фронта пожара, м/мин	0,83
3	Глубина прогорания ЛГМ, см	0,83
4	Сгоревший запас ЛГМ, г/м ²	0,89

Интенсивность пожара или интенсивность горения на кромке пожара является прямым фактором воздействия на древостой и на послепожарный отпад деревьев (коэффициент корреляции 0,90). При горении выделяется большое количество тепловой энергии, и чем выше интенсивность пожара, тем больше выделяется тепловой энергии, воздействующей на крону, стволы и корни деревьев.

Скорость фронта пожара не является прямым фактором повреждения древостоя, но определяет вид и интенсивность пожара, а также влияет на количество сгоревших ЛГМ и время воздействия высоких температур на дерево. Поэтому этот фактор опосредованно влияет на послепожарный отпад деревьев (коэффициент корреляции 0,83).

Количество сгоревших ЛГМ при пожаре тесно связано с интенсивностью горения и скоростью распространения фронта пожара. Количество выделившейся энергии при сгорании ЛГМ напрямую влияет на древостой и послепожарный отпад деревьев (коэффициент корреляции 0,89).

Величина глубины прогорания слоя напочвенных ЛГМ, включая подстилку, не только характеризует количество сгорающих ЛГМ, но и возможность повреждения корневой системы деревьев, которое приводит к гибели дерева, даже если его ствол не обгорел. Прогорание слоя подстилки до 3-4 см приводит к частичному отпаду деревьев (5-20%), а более 6 см в 100% случаев к значительному отпаду (71,1% и 89,3%).

Установлена тесная связь глубины прогорания слоя и сгоревшего количества ЛГМ с показателем ПВ-1, характеризующим погодные условия, влияющие на высыхание напочвенных ЛГМ, коэффициенты корреляции 0,90 и 0,84, соответственно. Таким есть, значения глубины прогорания слоя напочвенных ЛГМ и

показателя ПВ-1 могут использоваться для прогнозирования не только поведения пожара, но и послепожарного отпада деревьев.

Заключение

Таким образом, в результате длительного мониторинга после низовых пожаров разной интенсивности в сосняках выявлена тесная связь величины послепожарного отпада деревьев с факторами непосредственного воздействия пожара, такими как интенсивность и скорость распространения пожара, глубина прогорания и сгоревший запас ЛГМ, а также с факторами, влияющими на высыхание ЛГМ и возможность их сгорания. Применение множественного регрессионного анализа позволило оценить степень влияния факторов среды и параметров пожара на послепожарный отпад деревьев в среднетаежных и южнотаежных сосняках. Для снижения ущерба от пожаров и потери древесины следует уделять больше внимание профилактическим противопожарным мероприятиям в лесу, таким как контролируемые выжигания, снижающие запасы напочвенных ЛГМ и раннее обнаружение лесных пожаров.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке госзадания Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН КНЦ СО РАН № FWES -2024-0007, Рег. НИОКТР № 124012900559-4

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Побединский А. В. Сосновые леса Средней Сибири и Забайкалья. - М.: Наука, 1965. - 268 с.
2. Уткин А. И. Влияние огня на природу и формирование лиственничников Центральной Якутии // Лесное хозяйство. 1965. N1. С. 46-51.
3. Фурьев В. В. Роль пожаров в процессе лесообразования. - Новосибирск: Наука, 1996. - 251 с.
4. Буряк Л. В., Каленская О. П., Кукавская Е. А., Лузганов А. Г. Зонально-географические особенности воздействия пожаров на лесообразование светлохвойных насаждений юга Сибири. - Новосибирск: Наука, 2022. - 284 с.
5. Мелехов И. С. Влияние пожаров на лес. - М.- Л.: Гослестехиздат, 1948. - 126 с.
6. Мелехов И. С. О закономерностях в периодичности горимости лесов // Сборник работ по лесному хозяйству и лесохимии. - Архангельск: Северо-западное книжное издательство, 1971. - С. 4-26.
7. Молчанов А. А. Влияние лесных пожаров на древостои // Труды Института леса АН СССР. Т.16. - М.: АН СССР, 1954. - С. 314-335.
8. Софронов М. А. Лесные пожары в горах Южной Сибири. - М.: Наука, 1967. - 150 с.
9. Шубин Д. А., Залесов С. В. Послепожарный отпад деревьев в сосновых насаждениях Приобского водоохранного сосново-березового лесохозяйственного района Алтайского края // Аграрный вестник Урала. 2013. № 5 (111). С. 39-41.
10. Adámek M., Hadincová V., Wild J. Long-term effect of wildfires on temperate *Pinus sylvestris* forests: Vegetation dynamics and ecosystem resilience // Forest Ecology and Management. 2016. V. 380. P. 285-295.
11. Bottero A., D'Amato A. W., Palik B. J., Kern C. C., Bradford J. B., Scherer S. S. Influence of repeated prescribed fire on tree growth and mortality in *pinus resinosa* forests, Northern Minnesota // Forest Science. 2017. V. 63. Iss. 1. P. 94-100.

12. Reinhardt E. D., Keane R. E., Brown J. K. Modeling fire effects // International Journal of Wildland Fire. 2001. Vol. 10. N 3- 4. P. 373-380.
13. Воинов Г. С., Софронов М. А. Прогнозирование отпада в древостоях после низовых пожаров // Современные исследования типологии и пирологии леса. -Архангельск: АИЛиЛх. 1976. С. 115-121.
14. Балбышев И. Н. Сравнительная пожароустойчивость лесных пород таежной зоны // Лесные пожары и борьба с ними. - М.: Изд-во АН СССР. 1963. С. 114-136.
15. Санников С. Н. Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной. - М.: Наука. 1992. - 264 с.
16. Иванова Г. А., Иванов А. В. Пожары в сосновых лесах Средней Сибири. Новосибирск: Наука, 2015. 240 с.
17. Cottam G., Curtis J. T. The use of distance measures in phytosociological sampling // Ecology. 1956. V. 37. P. 451-460.
18. McRae, D. J., Conard S. G., Ivanova G. A. et all. Variability of Fire Behavior Fire Effects and Emissions in Scotch Pine Forests of Central Siberia //Mitigation and Adaptation Strategies for Global Cnange. 2006. Vol. 11 №1. P. 45-74.
19. Гирс Г. И. Физиологические аспекты устойчивости хвойных растений к огневым воздействиям // Проблемы лесоведения в Сибири. М.: Наука. 1977. С.148-159.

© Г. А. Иванова, В. А. Иванов, Е. А. Кукавская, П. Д. Третьяков, 2026

В. А. Соколов¹✉, О. П. Втюрина¹, А. А. Злобин¹

О стратегии развития лесного сектора России

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, г. Красноярск, Российская Федерация
e-mail: sokolovva@ksc.krasn.ru

Аннотация. Задачами стратегии развития лесного комплекса России являются: переход к устойчивому развитию предприятий лесного сектора; обеспечение ускорения инвестиционного процесса, направленного на обновление, техническое и технологическое перевооружение производств; формирование информационного обеспечения лесного сектора на основе современных технологий лесоустройства; снижение уровня нелегальных лесозаготовок; повышение социально-экономического уровня жизни работников лесного сектора и создание новых рабочих мест. Стратегия должна максимально учитывать природно-экономические условия по лесорастительным зонам и лесным районам, а также государственную политику в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов. Основной целью стратегии является рост объемов производства продукции на внутреннем и внешнем рынках на базе устойчивого управления лесами. Длительный период воспроизводства лесов указывает на необходимость принятия решений, результаты которых будут проявляться много десятилетий спустя. Система действий в лесном секторе должна быть нацелена на адаптацию лесов к прогнозируемым природным и экономическим изменениям.

Ключевые слова: стратегия развития, лесной сектор России, экосистемное планирование, государственная политика

V. A. Sokolov¹✉, O. P. Vtyurina¹, A. A. Zlobin¹

On the development strategy for the Russian forest sector

¹Sukachev Institute of Forest Russian Academy of Science Siberian Branch,
Krasnoyarsk, Russian Federation
e-mail: sokolovva@ksc.krasn.ru

Abstract. The objectives of the development strategy for the forest complex in Russia are: transition to sustainable development of forest enterprises; ensuring acceleration of the investment process aimed at modernization, technical and technological upgrading of production facilities; information provision for the forest sector based on modern forest management technologies; reduction of illegal logging; improvement of social and economic living standards of forest workers and creation of new jobs. The strategy should take into account as much as possible the natural and economic conditions of vegetation zones and forest areas, as well as state policy in the field of forest use, forest protection and reforestation. The core target of the strategy is to increase production volumes in domestic and foreign markets based on sustainable forest management. The long-termed reforestation indicates the need to make decisions, the results of which will manifest themselves many decades later. The forest-sector action system should aim at adapting forests to foreseeable natural and economic changes.

Keywords: development strategy, forest sector of Russia, ecosystem planning, state policy

Необходимость разработки стратегии адаптивного управления бореальными лесами в условиях глобальных изменений диктуется законом от 28 июня

2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» и указом Президента Российской Федерации от 8 ноября 2021 г. № 633 «Об утверждении Основ государственной политики в сфере стратегического планирования в Российской Федерации». Решение этой задачи невозможно без оценки природных и антропогенных воздействий на лесные экосистемы и динамики лесов за максимально возможный период.

Одной из ключевых целей, стоящих перед лесной отраслью, является интенсификация использования и воспроизводства лесов. Учитывая уровень лесного хозяйства России, задачи воспроизводства лесных ресурсов и их рационального использования будут оставаться актуальными на ближайшую и среднесрочную перспективу.

В последние годы разработаны различные концепции и стратегии развития лесного сектора Российской Федерации и ее субъектов.

К сожалению, эти документы по своей сути были направлены на развитие лесопромышленного комплекса, т. е. древесинопользование. Между тем, лесной сектор состоит из пяти основных взаимосвязанных блоков [1, 2]:

1. Лесное хозяйство, обеспечивающее рациональное использование, охрану, защиту и воспроизводство лесов;
2. Лесопромышленный комплекс;
3. Промысловое использование лесов;
4. Сельскохозяйственное использование лесов;
5. Биосферное использование лесов.

Все леса имеют многофункциональное значение, поэтому организация лесного хозяйства в современных условиях должна быть направлена прежде всего на многоцелевое лесопользование с несомненным приоритетом биосферного использования лесов. Необходимо признать равнозначность функций леса, что повлечет за собой признание равнозначности режимов лесопользования. Поэтому эксплуатационный режим – такой же вид лесопользования, как водоохранный, запретный, рекреационный и др.

Лесной комплекс России развивается по экстенсивному пути. Это обусловлено отчасти объективными экономическими причинами и кажущимся избытком или, по крайней мере, отсутствием дефицита лесных ресурсов на настоящий момент времени.

При разработке любых стратегий развития лесного комплекса важна достоверность заложенных в их основу данных о лесных ресурсах. Эти данные базируются на материалах лесоустройства разной давности. В целом по Сибири преобладают материалы лесоустройства давностью более 10 лет. Поэтому любые решения в сфере лесопользования и организации хозяйства в лесах неизбежно будут иметь неопределенный характер.

Проблема лесопользования – это проблема собственника лесов, т. е. государства, разрешение которой возможно за счет применения современных технологий лесоинвентаризации на базе средств дистанционного зондирования Земли. Нами была разработана и направлена в Рослесхоз для апробации технология лесоинвентаризации на основе сочетания лазерной съемки и аэрокосмических

снимков [3, 4]. Технология обеспечивала повышение точности работ до уровня I разряда лесоустройства с экономической эффективностью около 200 %. Рослесхоз отреагировал в лучших бюрократических традициях: технология заслуживает внимания, но в связи с отсутствием средств апробация откладывается на неопределенное время. Между тем, в мировой практике лазерные технологии становятся обыкновенным средством для лесоинвентаризации [5–8].

При осуществлении Стратегии развития лесного комплекса России должны быть максимально учтены природно-экономические условия по лесорастительным зонам и лесным районам, Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 г., а также Прогноз развития лесного сектора Российской Федерации до 2030 года [9].

В стратегии должны быть учтены все пять вышеуказанных блоков, составляющих лесной комплекс. В ее содержании следует учитывать основополагающие факторы:

- основы организации устойчивого лесопользования (своевременность и достоверность данных о лесных ресурсах, их эколого-экономическая доступность и оценка, экономически доступные ежегодные расчетные лесосеки, возрасты и способы рубок, охрана окружающей среды, способы и технологии рубок, дорожное строительство и лесная инфраструктура, ревизия инвестиционных проектов на предмет соответствия лесосырьевым ресурсам, организация модельных лесов, организация хозяйства в защитных, в том числе кедровых, лесах и др.);

- разработка региональных правил использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов;

- формы и методы частногосударственного партнерства в сфере использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов, направленные на совершенствование организации устойчивого лесопользования;

- повышение экономической эффективности лесного комплекса;

- соблюдение интересов населения, прежде всего лесных поселков и общин.

На наш взгляд, следует разработать основные направления развития лесного сектора России с привлечением ведущих квалифицированных региональных специалистов науки и практики.

Цель стратегии – рост объемов производства продукции, необходимой для удовлетворения спроса на внутреннем и внешнем рынках на базе приоритетного развития глубокой переработки древесины для повышения эффективности и конкурентоспособности, а также устойчивого управления лесами.

Задачи:

- переход к устойчивому развитию предприятий лесного сектора с обеспечением экологического оздоровления производств и экологической чистоты продукции;

- обеспечение ускорения инвестиционного процесса, направленного на обновление, техническое и технологическое перевооружение производств;

- формирование информационного обеспечения лесного сектора на основе современных технологий лесоустройства;

- снижение уровня нелегальных лесозаготовок;
- повышение социально-экономического уровня жизни работников лесного сектора и создание новых рабочих мест.

Предлагается следующее содержание стратегии и основных направлений развития лесного комплекса России:

Введение

Анализ современного состояния лесного комплекса

Заготовка древесины

Переработка древесины

Оценка рынков лесобумажной продукции, внутреннее потребление, экспорт и импорт

Инвестиции

Социальная инфраструктура

Основные проблемы

Оценка лесосырьевого потенциала

Площади и запасы лесов

Динамика лесного фонда

Достоверность информации о лесах

Действующие и экономически доступные ежегодные расчетные лесосеки

Эколого-экономическая оценка лесных ресурсов

Стратегические направления развития лесного комплекса

Совершенствование лесной политики

Развитие глубокой переработки древесины

Использование отходов

Инвестиции в инновационное развитие лесного комплекса

Повышение бюджетного дохода

Повышение социального потенциала

Снижение уровня нелегальных рубок леса

Воспроизводство, охрана и защита лесов

Сохранение биоразнообразия, снижение экологических рисков, сертификация

Образование, наука и инновационные технологии

Механизм реализации стратегии и основных направлений развития лесного комплекса России

Прогноз результатов реализации стратегии и основных направлений развития лесного комплекса России

Приложения

С учетом вышесказанного и должна разрабатываться Стратегия развития лесного комплекса России. При этом необходимо исключить негативный опыт разработки и исполнения предыдущих стратегий, концепций и программ, в котором была разорвана комплексность пяти взаимосвязанных блоков лесного сектора и, прежде всего, лесного хозяйства и лесопромышленного комплекса. Без

возрождения лесного хозяйства, которое было развалено реформами 2000-х и последующих годов, невозможно успешное развитие лесопромышленного комплекса. Эта взаимосвязь обязана учитывать влияние трех остальных блоков лесного комплекса и, прежде всего, биосферную роль лесных экосистем.

Исходным постулатом стратегии лесной политики должна служить парадигма устойчивого управления лесами. Соответствие систем ведения лесного хозяйства принципам устойчивого управления должно оцениваться при помощи ряда критериев и индикаторов, среди которых следует выделять сохранение лесов в хорошем жизненном состоянии, повышение их вклада в депонирование углерода, сохранение ресурсных (древесных и недревесных) и защитных (водоохраннх и почвозащитных) функций, сохранение биоразнообразия, усиление социально-экономических функций леса.

Необходимо признать, что качество окружающей среды в большей степени зависит от экосистемных функций леса, чем от ресурсных. Эти функции пока не могут быть точно оценены. Но понимание того, что растущий лес более значим, чем срубленные деревья, обозначает необходимость перехода к экосистемному планированию и лесоуправлению. Существующее лесное планирование уделяет основное внимание моноресурсному подходу, т. е. древесинопользованию. Этот односторонний подход необходимо срочно изменить.

Устойчивое управление лесами необходимо рассматривать как постоянно обучающуюся динамическую систему, предполагающую использование новейших научных результатов и непрерывное корректирование принимаемых решений, что полностью соответствует научному пониманию целесообразных путей коэволюции человека и природы в меняющемся мире.

Глобальная мировая политика неизбежно сказывается на состоянии лесного сектора России. Жестокое санкционное давление со стороны «недружественных» стран разорвало давно сложившиеся связи на мировом рынке, что заставляет перекраивать лесную логистику. Это приводит к ухудшению экономического состояния лесного сектора и возникновению кризисных явлений, подобных мировому кризису 2008–2009 гг. Потребовалась переориентировка сбыта лесной продукции на азиатско-тихоокеанские рынки. Кроме того, потребуется усиление внимания к внутренним рынкам потребления лесной продукции. Эти проблемы должны найти немедленное отражение в долгосрочных стратегиях развития лесного сектора России и субъектов РФ.

В стратегиях и концепциях не показано решение проблемы финансирования лесного хозяйства в новых условиях. Оценки леса, исходящие только из учета древесины, приносят объективный вред лесному хозяйству, поскольку занижают ценность многих лесных участков, которые имеют большое экологическое и социальное значение. Да и сама оценка древесины базируется фактически на лесных таксах советских времен (прейскурант 07-01). Поэтому необходимы разработка и внедрение методик и нормативов эколого-экономической оценки лесных ресурсов, соответствующих реальным социально-экономическим условиям.

Для безболезненного перехода России к устойчивому управлению лесами в ближайшей перспективе лесной отрасли Сибири необходимо ориентироваться

на более широкое внедрение модели интенсивного использования и воспроизводства лесов, которая предполагает повышение продуктивности лесов и комплексное использование лесных ресурсов. Такой подход невозможен без широкого применения достижений лесной науки, новейших технологий и технических средств.

Лесному хозяйству необходимо в полной мере использовать потенциал научных организаций для разработки эффективных способов борьбы с негативными процессами и явлениями в лесах Российской Федерации (борьба с лесными пожарами, защита от вредителей и болезней, новые методы инвентаризации лесов, применение биотехнологий для переработки и утилизации отходов лесозаготовки и т. д.). В этом контексте следует рассмотреть вопрос о создании опытных лесных хозяйств с приданием им особого статуса, позволяющего апробировать инновационные методы ведения лесного хозяйства с последующим распространением положительного опыта.

Особое внимание следует уделить вопросу специфики организации лесного хозяйства в защитных лесах, включая кедровые. Грамотное ведение хозяйства в этой категории лесов должно быть направлено на поддержание и усиление их защитных функций и одновременно не допускать неоправданных потерь лесной продукции, генерируемой защитными лесами.

Тенденцией развития современного лесного комплекса является переход к многоцелевому лесопользованию, при котором древесина является одним из лесных ресурсов, причем не всегда основным. И прежде всего это относится к защитным лесам [10]. В то же время в пользовании лесными ресурсами всегда преобладают экономические интересы. «Необходимо признать эти реалии, понять их неизбежность и, отрешившись от несбыточных идеалов, постараться найти адекватные методы нормирования пользования каждым видом лесных полезностей, в первую очередь, спелой древесиной» [11, с. 160].

М. М. Орлов в своей последней книге «Леса водоохранные, защитные и лесопарки. Устройство и ведение хозяйства» [12] на примере лесов Московской области предложил систему способов рубок с учетом целевого назначения лесов, не исключая и сплошнолесосечные рубки.

В высокоразвитых лесных странах запрет рубок в защитных лесах недопустим. В Австрии, Швейцарии, Японии, горных лесах Германии, Франции, которые по нашим меркам являются защитными, рубки не запрещены, ведутся способами, соответствующими природе этих лесов, а их размер контролируется текущим приростом древостоев по методу Гюрно-Биоллея [1].

Запрет рубок в защитных лесах явился одной из причин расширения незаконных рубок, наибольшие объемы которых наблюдаются как раз в этих лесах (водоохранные зоны, защитные полосы вдоль дорог, зеленые зоны и др.).

Рациональная практика ведения хозяйства в защитных лесах предусматривает своевременную выборку спелой древесины соответствующими природе защитных лесов способами рубок. В одновозрастных древостоях следует применять узколесосечные сплошные рубки, которые экологически более приемлемы,

чем выборочные или постепенные. Это касается прежде всего сосновых древостоев в Приангарском таежном и лесостепных районах Сибири.

Переход лесного хозяйства на рельсы устойчивого развития невозможен без решения проблемы квалифицированных кадров. К сожалению, качество подготовки специалистов лесного профиля в ВУЗах за последнее время существенно снизилось. По разным причинам, в том числе вследствие тренда научных исследований в сторону глобальных климатических изменений, уменьшилось количество аспирантов, ведущих исследования по лесной тематике. Этой проблеме также необходимо уделять серьезное внимание.

Особо важной проблемой является правильная расстановка кадров в сфере лесоправления и обеспечение лесной отрасли профессионалами высокого уровня. В структуре управления, определяющей развитие отрасли, должны быть специалисты, имеющие профильное образование с серьезной практикой работы в лесном комплексе.

Кризисные явления в лесном секторе негативно сказываются прежде всего на лесном хозяйстве, что подтверждается всей историей лесных отношений в Российском государстве. Лесное хозяйство – это отрасль материального производства, в которой, как и в ЛПК, действуют законы рыночной экономики. Исходя из этого и необходимо возрождать лесное хозяйство в России. Основой возрождения будет объективная рыночная эколого-экономическая оценка лесных ресурсов, позволяющая через механизмы лесной ренты перейти от дотационной схемы финансирования лесохозяйственного производства и лесоправления к системе, обеспечивающей ведение правильного лесного хозяйства и прибыль.

Длительный период воспроизводства в лесном хозяйстве показывает необходимость принятия решений, результаты которых будут проявляться много десятилетий спустя. Система действий в лесном секторе должна быть нацелена на адаптацию лесов к прогнозируемым природным и экономическим изменениям.

Работа подготовлена в рамках базового проекта FWES-2024-0007 «Роль природных и антропогенных факторов в системе устойчивого управления лесами Сибири». Регистрационный номер НИОКТР 124012900559-4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы управления лесами Сибири / Соколов В. А. – Красноярск: Изд-во СО РАН, 1997. – 308 с.
2. Соколов В. А. Перспективы развития лесного комплекса Сибири // Сиб. экол. журн. – 2008. – № 3. – С. 361–369.
3. Фарбер С. К., Соколов В. А., Данилин И. М., Втюрина О. П., Соколов И. В. Метод ландшафтно-статистической лесоинвентаризации на основе лазерного зондирования и космической съемки лесного покрова // Лесоведение. – 2003. – № 5. – С. 3–9.
4. Фарбер С. К., Соколов В. А. Основные положения технологии лесоинвентаризации на основе выборочных данных лазерной съемки и цифровых космических снимков // Лесн. хоз-во. – 2009. – № 4. – С. 38–39.
5. Gregoire T. G., Ståhl G., Næsset E., Gobakken T., Nelson R., Holm S. Model-assisted estimation of biomass in a LiDAR sample survey in Hedmark County, Norway // Can. J. For. Res. – 2011. – V. 41. – N. 1. – P. 83–95.

6. Ståhl G., Holm S., Gregoire T. G., Gobakken T., Næsset E., Nelson R. Model-based inference for biomass estimation in a LiDAR sample survey in Hedmark County, Norway // *Can. J. For. Res.* 2011. V. 41. N. 1. P. 96–107.
7. Ene L. T., Næsset E., Gobakken T., Gregoire T. G., Ståhl G., Nelson R. Assessing the accuracy of regional LiDAR-based biomass estimation using a simulation approach // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 123. P. 579–592.
8. Stephens P. R., Kimberley M. O., Beets P. N., Paul T. S. H., Searles N., Bell A., Brack C., Broadley J. Airborne scanner LiDAR in a double sampling forest carbon inventory // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 117. P. 348–357.
9. Прогноз лесного сектора Российской Федерации до 2030 года. – FAO, Рим, 2012. – 86 с.
10. Шейнгауз А. С. Многоцелевое лесопользование: опыт разработки системы понятий // *География и природные ресурсы*. – 1984. – № 2. – С. 11–19.
11. Шейнгауз А. С. Лесопользование: непрерывное и равномерное или экономически обусловленное? // *Лесная таксация и лесоустройство*. – 2007. – № 1(37). – С. 157–167.
12. Орлов М. М. Леса водоохранные, защитные и лесопарки. Устройство и ведение хозяйства. – М.: Лесн. пром-сть, 1983. – 89 с.

© В. А. Соколов, О. П. Втюрина, А. А. Злобин, 2026

В. А. Иванов^{1,2✉}, Г. А. Иванова¹

Методические основы классифицирования лесной территории по опасности возникновения пожаров от гроз

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет науки и технологий,
г. Красноярск, Российская Федерация
e-mail: ivanovv53@yandex.ru

Аннотация. В последнее десятилетие на территории Средней Сибири возросло количество лесных пожаров от гроз. Оценка факторов, влияющих на возникновение лесных пожаров от гроз, показала, что наиболее значимыми из них являются: лесистость территории, среднее число дней с грозой, наличие песчаных и супесчаных почв, коэффициент природной пожарной опасности, количество дней с высокими классами пожарной опасности по условиям погоды, число пожаров от гроз. Разработаны методические основы классифицирования лесной территории по степени опасности возникновения лесных пожаров от гроз на основе показателей фактической горимости и оценки факторов, влияющих на возникновение пожаров от гроз. При классификации использован сравнительный анализ применения весовых коэффициентов и коэффициентов значимости в классификационных геоэкологических моделях. На основе полученных данных проведена классификация пожароопасности территории лесничеств Красноярского края по степени опасности возникновения лесных пожаров от гроз

Ключевые слова: лесные пожары, пожарная опасность, грозы, классифицирование лесных территорий

V. A. Ivanov^{1,2✉}, G. A. Ivanova¹

Methodological bases of classification of forest territory by the risk of fires from lightning

¹V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, FRC KSC SB RAS,
Krasnoyarsk, Russian Federation

²Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation
e-mail: ivanovv53@yandex.ru

Abstract. Over the past decade, the number of lightning-induced forest fires has increased in Central Siberia. An assessment of the factors influencing the occurrence of lightning-induced forest fires revealed that the most significant are: forest cover, average number of days with thunderstorms, presence of sandy and sandy loam soils, natural fire hazard coefficient, number of days with high fire hazard classes based on weather conditions, and the number of lightning-induced fires. The methodological framework for classifying forested areas by the degree of thunderstorm-induced forest fire hazard has been developed based on actual flammability indicators and an assessment of the factors influencing the occurrence of lightning-induced fires. The classification utilized a comparative analysis of the application of weighting factors and significance coefficients in geoeological classification models. Based on the data obtained, a classification of the fire hazard of Krasnoyarsk region forestry areas by the degree of lightning-induced forest fire hazard has been conducted.

Key words: forest fires, fire hazard, lightning, classification of forest areas

Введение

На территории Средней Сибири ежегодно возникают сотни лесных пожаров от гроз. В последние десятилетия увеличилось количество лесных пожаров от гроз и их площади, что связано с изменением климата и грозоактивности, а также с интенсивным индустриальным освоением лесных территорий [1 - 3]. Факторы, оказывающие влияние на частоту пожаров от гроз, ранее частично рассмотрены в ряде научных работ [3, 4 - 6].

Целью данной работы является разработка методических основ классификации лесной территории по опасности возникновения пожаров от гроз для совершенствования охраны лесов от пожаров.

Методы и материалы

Классифицирование лесной территории необходимо для оценки возможности возникновения лесного пожара от грозы с учетом региональных условий. При классифицировании использован научный подход, основанный на экспертных оценках [7], при этом использован сравнительный анализ применения весовых коэффициентов и коэффициентов значимости в классификационных геоэкологических моделях [8]. Проведен анализ факторов, оказывающих влияние на возможность возникновения пожаров от гроз, и произведены расчеты интегрального показателя для каждого лесничества. Для количественной оценки факторов использовали весовые коэффициенты, рассчитанные по методике А. В. Короленко [9]. Для оценки фактической горимости лесов за анализируемый период по числу случаев загораний на 100 тыс. га за сезон и по пройденной огнем площади (га) на 100 тыс. га за сезон использована шкала, разработанная М. А. Софроновым [10]. Классифицирование по степени опасности возникновения пожаров от гроз выполнено на основе показателей фактической горимости лесов и факторов, влияющих на возникновение пожаров от гроз, на примере территории Красноярского края.

Результаты

За период с 2004 по 2024 годы по данным «ИСДМ-Рослесхоз» [11] на территории Красноярского края было зарегистрировано более 23 тысяч лесных пожаров (рис. 1). В последнее десятилетие количество лесных пожаров от гроз возросло и составило в 2018 году 70% от общего числа пожаров.

Классифицирование лесной территории по опасности возникновения пожаров от гроз осуществлялось на основе анализа статистических данных по лесным пожарам на территории лесничеств Красноярского края. В основу классификации территорий лесничеств по опасности возникновения лесных пожаров от гроз положен интегральный показатель по природным факторам. Для его расчета были использованы данные о среднем числе дней с грозой, площади песчаных и супесчаных почв, коэффициенте природной пожарной опасности территории лесничества, количестве дней с III – V классами пожарной опасности по условиям погоды, количестве пожаров в летний период, лесистости территории лесничества.

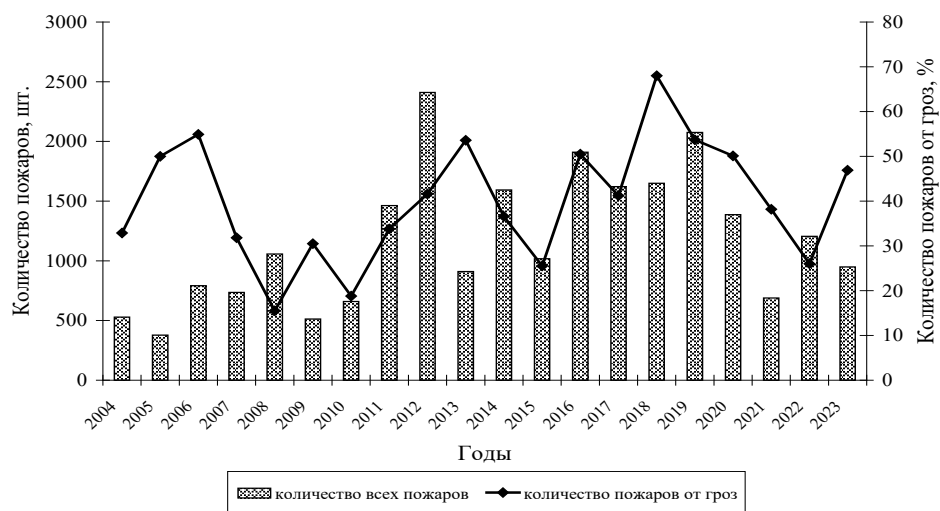


Рис. 1. Динамика лесных пожаров на территории Красноярского края

Обсуждение

Грозовая деятельность. Число дней с грозой и продолжительность гроз зависят в основном от физико-географических условий местности. Грозовая деятельность на территории лесничеств края варьирует: среднее число дней с грозой изменяется от 10 до 37. С продвижением, на юг число дней с грозой возрастает. Регистрация внутримассовых гроз, от которых в основном и возникают лесные пожары, затруднительна, так как они носят кратковременный и локальный характер.

Доля площади песчаных и супесчаных почв – это доля территории, где наибольшая вероятность загорания напочвенных горючих материалов от молнии. Данные о гранулометрическом составе почвы взяты из Единого государственного реестра почвенных ресурсов России [12]. Песчаные и супесчаные почвы имеют высокое удельное сопротивление, благодаря этому ток молнии, растекаясь по напочвенному покрову, образует длинный искровой разряд, который на своем пути вызывает загорание ЛГМ. Суглинистые и глинистые почвы имеют низкое удельное сопротивление в связи, с чем в местах удара ток молнии практически не растекается и происходит ее заземление [6].

Оценку пожароопасности лесных горючих материалов (ЛГМ) на территории лесничества обычно приводят по среднему классу природной пожарной опасности, но он не дает полного представления о доли лесных участков, способных загораться от молнии при соответствующих погодных условиях. В связи, с этим мы использовали коэффициент природной пожарной опасности, разработанный и предложенный Г. П. Телицыным [13], который учитывает только долю площадей участков с I - II классами природной пожарной опасности в общей площади лесничества.

Доля количества дней с III – V классами пожарной опасности по погоде показывает продолжительность пребывания лесных участков в пожароопасном состоянии за сезон [14].

Доля пожаров в летний период от общего количества пожаров показывает, когда на территории лесничества наблюдается пик горимости и совпадает ли он с грозовой активностью.

Лесистость территории лесничества определяет вероятность попадания разряда молнии в лесной участок, находящийся на территории лесничества.

Связь частоты пожаров от гроз с рассмотренными факторами прямая (коэффициент корреляции 0,68). Сочетание повторяемости тех или иных факторов в пожароопасном сезоне определяет количество пожаров от гроз на лесной территории. Для каждого лесничества были рассчитаны средние числовые показатели факторов, оказывающие влияние на возможность возникновения пожара от грозы, и средние интегральные показатели оценки пожарной опасности от гроз на основе взвешенных частных факторов по данным для каждого лесничества и для края в среднем.

В основу классификации территорий лесничеств по опасности возникновения лесных пожаров от гроз положен интегральный показатель по природным факторам. Для оценки степени пожарной опасности от гроз по интегральному показателю разработана равномерно расширяющаяся шкала с пятью классами (табл.1).

Таблица 1. Классификация лесной территории лесничеств по степени опасности возникновения лесных пожаров от гроз

Класс пожарной опасности	Средний интегральный показатель	Степень опасности возникновения лесных пожаров от гроз	Количество лесничеств Красноярского края
1	менее 0,21	очень низкая	9
2	0,22 – 0,32	низкая	11
3	0,33 – 0,43	умеренная	15
4	0,44 – 0,57	повышенная	13
5	0,58 и более	высокая	10

К высокой степени пожарной опасности в Красноярском крае отнесены 10 лесничеств, в том числе два северных лесничества (Туруханское и Нижне-Енисейское) и восемь лесничеств Нижнего Приангарья.

Заключение

Таким образом, при классифицировании лесной территории по степени опасности возникновения лесных пожаров от гроз на примере Красноярского края использован научный подход, основанный на экспертных оценках с использованием сравнительного анализа и применения весовых коэффициентов и коэффициентов значимости. Классифицирование лесной территории по степени опасности возникновения лесных пожаров от гроз позволяет дифференцировано планировать работы по охране лесов от пожаров. Так в лесничествах с высокой и повышенной пожарной опасностью от гроз рекомендуется разработка региональных шкал пожарной опасности от гроз по условиям погоды. Особое зна-

чение для лесничеств с умеренной, низкой и очень низкой пожарной опасностью от гроз приобретает проведение агитационно-разъяснительной работы с местным населением в весенний период.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке госзадания Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН КНЦ СО РАН № FWES -2024-0007, Рег. НИОКТР № 124012900559-4

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Coldammer J. G. International Seminar of Forest Fire Prevention and Control in Warsaw // Fire Management Notes. 1982. - 43. № 3. P. 18-21
2. Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C.P., Flannigan M.D. Wildfires in the Siberian taiga // Ambio. A Journal of the Human Environment. 2021. 50(11),1953–1974.<https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
3. Иванов В.А., Пономарев Е. И., Иванова Г. А., Мальканова А. В. Грозы и лесные пожары в современных климатических условиях Средней Сибири // Гидрология и климатология. 2023, №7, с. 102-113.
4. Матвеев П.М., Филиппов А. В. Особенности профилактики лесных пожаров от гроз // Лесное хозяйство.- 1985. N 9. С. 56-57.
5. Иванов В. А., Коршунов Н. А., Матвеев П. М. Пожары от молний в лесах Красноярского Приангарья. Красноярск: СибГТУ, 2004. 132 с.
6. Иванов В.А. Иванова Г.А. Пожары от гроз в лесах Сибири. Новосибирск, Наука, 2010, 164 с.
7. Коробов В.Б., Кочуров Б.И., Тутыгин А.Г. Методология районирования сложных геолого-экологических объектов экспертно-статистическими методами // Геоэкология. 2020. №5. С. 42-48.
8. Лохов А.С., Коробов В.Б. Сравнительный анализ применения весовых коэффициентов и коэффициентов значимости в классификационных геоэкологических моделях. // Геоэкология. 2022. №4. С. 81-86.
9. Короленко А.В. Методика построения интегральных индексов как инструмент демографического районирования регионов России. // Вопросы территориального развития. 2017. Вып. 4(39). С. 1-18.
10. Софронов М. А., Волокитина А. В. Пирологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск: Наука. 1990. 204 с.
11. ИСДМ-Рослесхоз – Открытые данные. – [Электронный ресурс]: https://public.aviales.ru/main_pages/public.shtml (дата обращения: 10.11.2024).
12. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Москва 2014. под редакцией А.Л Иванова, С.А. Шоба. стр. 760
13. Телицын Г. П. Определение пожарной опасности на лесной территории. Хабаровск: ДальНИИЛХ. 1989. 23 с.
14. Курбатский Н.П. Основы классификации участков лесного фонда по пожароопасности // Проспект научно-исследовательских работ для использования в народном хозяйстве. Красноярск: ИЛИД, 1974. – Вып.2. – С. 59-61.

© В. А. Иванов, Г. А. Иванова, 2026

Н. В. Петрова^{1,2✉}, Д. В. Васендин^{1,3}, А. Д. Петров¹

Отходы производства и потребления: региональный разрез (на примере Новосибирской области) в контексте общероссийских показателей

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kaf.ecolog@ssga.ru

Аннотация. Актуальность темы обусловлена ростом объемов образования отходов в том числе твердых коммунальных отходов, несовершенством системы их обработки и утилизации, а также необходимостью обеспечения экологической и социально-экономической стабильности региона. В статье рассмотрена сложившаяся проблематика, связанная с ежегодным ростом отхообразованния и недостаточной обеспеченностью не только объектами по утилизации и обезвреживанию отходов, но и переполненностью существующих объектов размещения отходов. Предложены пути решения на основе анализа международного и российского передового опыта.

Ключевые слова: отходы, отходы производства и потребления, переработка отходов, твердые коммунальные отходы, национальный проект «Экология», расширенная ответственность производителей

N. V. Petrova^{1,2✉}, D. V. Vasendin^{1,3}, A. D. Petrov¹

Production and consumption waste: a regional breakdown (using the Novosibirsk region as an example) in the context of national indicators

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

³Siberian State University of Telecommunications and Informatics,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kaf.ecolog@ssga.ru

Abstract. The relevance of the topic is due to the growing volume of municipal solid waste generation, the imperfection of the system of its treatment and disposal, as well as the need to ensure the environmental and socio-economic stability of the region. The article examines the current problems associated with the annual increase in waste generation and insufficient provision of not only waste disposal and neutralization facilities, but also overcrowding of existing waste disposal facilities. Solutions based on the analysis of international and Russian best practices are proposed.

Keywords: wastes, wastes of production and consumption, recycling of waste materials, solid municipal waste, the national Ecology project, extended producer responsibility

Введение

С ростом численности населения Земли ежегодно возрастает ресурсопотребление, увеличиваются объемы образующихся отходов, что ведет к сокращению территорий, пригодных для их захоронения, а значит, порождает проблему эффективной утилизации и переработки отходов.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения техногенной нагрузки на окружающую среду в условиях роста объемов образования отходов. Переход к принципам устойчивого развития и экономики замкнутого цикла требует максимального вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот, что сопряжено с экономическими и инвестиционными возможностями для регионов и предприятий. В то же время сохраняются острые социальные и управленческие проблемы: низкий уровень раздельного сбора отходов, износ инфраструктуры, недостаток инвестиций и противоречия в правовом регулировании. Реализация национальных проектов и внедрение ESG-подходов в региональном управлении делают актуальным анализ эффективности существующей системы обращения с отходами и поиск путей ее совершенствования.

Цель данного исследования проанализировать ключевые проблемы в сфере обращения с отходами в Новосибирской области и наметить возможные пути их решения.

Материалы и методы исследования

Исследование опирается на анализ официальных статистических данных, публикуемых Федеральной службой по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор) в рамках формы федерального статистического наблюдения № 2-ТП «Сведения об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления». Дополнительными источниками послужили доклады Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, аналитические обзоры Российского экологического оператора (РЭО), данные Контрольно-счётной палаты Новосибирской области, а также публикации в открытых источниках со ссылками на первичную статистику. Анализ охватывает период 2017–2024 гг., поскольку именно с 2017 года началась систематическая публикация детализированных данных по обращению с отходами в разрезе регионов. При обработке данных применялись методы сравнительного, динамического и структурного анализа.

Результаты исследования

Чтобы изменить сложившуюся в нашей стране систему управления отходами, которая базировалась на их захоронении, в 2019 году Минприроды РФ утвердил национальный проект «Экология», в котором отражены статистические и аналитические данные об экологическом состоянии страны, установлены мероприятия, нацеленные на его «оздоровление» и улучшение. Одна из основных целей проекта – создание эффективной системы обращения с отходами производства и потребления. Сроки реализации разработанных в паспорте мероприятий установлены до 2024

года. Вместе с тем на законодательном уровне ввели изменения, направленные с одной стороны на сокращение объемов отходов, вывозимых на полигоны, с другой на максимальное вовлечение отходов в новое производство.

По данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации в период с 2015 по 2023 гг с одной стороны наблюдается устойчивый рост объемов образующихся отходов, с другой – за последние 3 года происходит сокращение отходов отправляемых на утилизацию (рис. 1) [13]. За рассматриваемый период прирост отходов составил более 83 % (с 5,06 млрд.т до 9,3 млрд.т). Однако в 2024 г. по стране зафиксирован спад образования отходов на 8 % (8,5 млрд. т). Данное снижение образования отходов объясняется изменениями в законодательстве, в соответствии с которыми, часть вскрышных пород перестали относить к отходам.



Рис. 1. Динамика образования, утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления в РФ с 2015–2024 гг.

Сибирский Федеральный округ (СФО) является лидером по образованию отходов, на долю СФО приходится около 56 % от общероссийского объема отходов производства и потребления. Высокие значения показателей СФО обусловлены развитой отраслью по добыче полезных ископаемых. Именно горнодобывающая промышленность формирует в России 90 % общего объема образующихся отходов.

В то время как общие объёмы образования отходов образуются преимущественно за счёт производственного сектора, наибольшую социально-экономическую значимость имеет обращение с твёрдыми коммунальными отходами (ТКО). Несмотря на то, что в общем балансе отходов России доля ТКО не превышает 1–2 %, именно они создают основные экологические риски для городов и требуют сложной инфраструктуры сбора, сортировки и переработки.

Объем образования ТКО по России в 2024 году в зависимости от методики подсчета составил от 47,5 до 51,0 млн.тонн, а отправлено на утилизацию около 14 %, тогда как на захоронение по-прежнему поступает более 83 % отходов.

Вместе с тем по стране наблюдается позитивная динамика в части обработки (сортировки) ТКО: в 2024 году на обработку было направлено 53,3% коммунальных отходов против 34,9 % в 2019 году. Это свидетельствует о постепенном наращивании инфраструктуры сортировки, однако большая часть отсортированных отходов все еще размещается на полигонах.

При том, что общероссийский объём отходов сократился на 8 %, составив 8,5 млрд. тонн. Новосибирская область оказалась в числе восьми регионов-антилидеров, показавших значительный рост вопреки общероссийской тенденции.

Ситуация в регионе оценивается как критическая. Большая часть отходов отправляется на захоронение. В таблице представлены данные по образованию отходов за последние 5 лет.

Таблица. Динамика образования и захоронения ТКО в Новосибирской области

Год	Образование ТКО, в тыс.т.	Захоронение ТКО, в тыс. т
2020	833,8	826,1
2021	819,2	807,6
2022	830,4	814,3
2023	868,5	819,1
2024	882,6	827,8

Доля отходов, направляемых на утилизацию, обработку и обезвреживание, сократилась с 1,34% в 2022 году до 0,84% в 2023 году. В 2023 году было утилизировано всего 1,53 млн тонн отходов (на 22,0% меньше, чем годом ранее), обработано 79,14 тыс. тонн (снижение на 62,7%), обезврежено 5,1 тыс. тонн (снижение на 98,4 %). При этом в Сибирском федеральном округе Новосибирская область занимает лидирующую позицию по доле утилизации ТКО, которая, однако, составляет лишь 5,8 %.

Согласно данным государственного реестра объектов размещения отходов, в регионе насчитывается 18 действующих полигонов. Их общая заполненность достигла 86 %. Наиболее критическая ситуация складывается на крупнейших полигонах: «Гусинобродский» заполнен на 95% и должен быть закрыт в 2026 году, «Левобережный» также находится на грани исчерпания мощности. Полигоны в Искитиме, Бердске, Куйбышеве, Болотнинском и Краснозёрском районах находятся на грани переполнения. В регионе отсутствуют современные комплексы по переработке отходов (КПО), а создание новых объектов задерживается на 1–3 года.

Полученные данные свидетельствуют о наличии глубокого разрыва между общероссийской и региональной динамикой обращения с отходами. На фоне некоторого снижения общего объёма отходов по стране в 2024 году Новосибирская область демонстрирует рекордный рост промышленных отходов (на 25 % за один год). Это ставит регион перед необходимостью срочного создания инфраструктуры для их переработки.

Международный опыт показывает, что эффективное обращение с отходами возможно при системном подходе. Германия, достигшая уровня переработки 67 %, успешно применяет механизм расширенной ответственности производителя и депозитную (залоговую) систему для пластиковых бутылок (переработка достигает 98 %). Южная Корея, перерабатывающая 59 % отходов, внедрила технологию RFID-контейнеров. Суть технологии заключается в оснащении мусорных контейнеров небольшим чипом с антенной, в виде наклейки или брелока, который содержит уникальный электронный паспорт (данные о владельце контейнера, его объеме, графике вывоза и т.п.).

Швеция перерабатывает или использует для получения энергии 99% отходов, импортируя мусор для обеспечения работы мусоросжигательных заводов.

В России отдельные субъекты РФ уже демонстрируют успешные практики. Например, депозитная система в России на государственном уровне пока не внедрена, однако работа в этом направлении ведется. Минпромторг и другие ведомства не раз обсуждали возможность введения залоговой стоимости для тары, особенно для пластиковых бутылок и алюминиевых банок, аналогично тому, что действует в Европе. Также в некоторых торговых сетях, например, «Вкус Вилл», уже устанавливают фандоматы, где покупатели могут сдать пластиковые и алюминиевые банки и получить небольшое вознаграждение, тестируя эту модель на практике. Таким образом, можно сказать, что система в России пока существует в виде пилотных корпоративных проектов и находится на стадии активного обсуждения.

Первыми регионами, которые внедрили RFID-системы еще в 2015 году стали Москва и ЦФО. В 2022 году Приморский край реализовал масштабный проект по внедрению данной технологии и оснастил радиометками 12,5 тыс. контейнеров.

Московская область занимает первое место в «Зелёном рейтинге» благодаря развитию инфраструктуры переработки. Челябинская область внедрила двухпоточную систему раздельного сбора, что позволило достичь 63% сортируемых отходов. Республика Мордовия оборудовала системами фотофиксации более 90% контейнерных площадок, обеспечив прозрачность процесса.

В Новосибирской области постановлением Правительства от 28.03.2023 г. № 123-п внесены изменения в государственную программу «Развитие системы обращения с отходами производства и потребления в Новосибирской области». Продлен срок реализации программы до 2026 года, общий объем финансирования составляет 9070101,1 тыс. рублей. Однако ожидаемые результаты, в частности снижение доли захоронения ТКО до 99,6 % к 2024 году свидетельствует о целевых ориентирах, не соответствующих масштабности проблемы.

Заключение

Результаты, представленные в статье, показывают, что, несмотря на общероссийскую тенденцию снижения объемов образования отходов (в 2024 году, составила – 8 %), Новосибирская область демонстрирует не только рекордный рост

отхоодообразования (+ 25 %), но и сокращение доли утилизируемых, обезвреженных и обработанных отходов (- 2,18 % за 2022-2023 г.г.).

Сложившаяся ситуация обусловлена переполненностью действующих полигонов, отсутствием современных комплексов по переработке отходов (КПО), низкий уровень внедрения раздельного сбора, деятельность «серых» перевозчиков.

Анализ международного и российского опыта в решении проблемы по обращению с отходами показывает и доказывает, что критическую ситуацию сложившуюся в Новосибирской области возможно решить следующим образом:

1. Ускоренное строительство КПО «Левобережный» и «Правобережный», а также проектирование и строительство КПО в каждом муниципальном районе области, что позволит решить проблему с переполнением полигонов отходов, а также сформирует базу, позволяющую импортерам и производителям товаров и упаковки, подпадающих под расширенную ответственность производителей, достичь требуемых нормативов утилизации. Стоит отметить, что на 30 марта 2025 г. в Новосибирской области не было ни одной компании, имеющей право заниматься утилизацией упаковки.

2. Внедрение цифрового мониторинга контейнерных площадок с применением RFID считывателей, что обеспечит:

- прозрачность для бизнеса (дает возможность фиксировать факт вывоза и контролировать водителей);
- контроль для органов власти, позволяет бороться с «серыми» перевозчиками и предотвращать несанкционированные свалки;
- оптимизацию процессов, так как собранные данные позволяют более эффективно выстраивать маршруты мусоровозов и распределять нагрузку на работников.

3. Развитие сети экокунктов, которые будут принимать не только пластик, стекло и макулатуру, но и автошины, которые часто используют для оформления дворов или просто сжигают, а также текстиль и другие отходы, имеющие большой срок разложения.

4. Введение в действие двухпоточной системы раздельного сбора. Несмотря на то, что наша область входит в число 47 субъектов РФ, где ведется сортировка в рамках такой модели, на деле существуют проблемы.

5. Продвижение видеоконтента в соцсетях, направленного на популяризацию осознанного потребления и раздельного сбора отходов.

6. Организация просветительских кампаний, нацеленных как на работу с детьми и молодежью, так и на взрослое население. Например, для формирования экологической культуры у детей можно использовать готовые бесплатные образовательные платформы такие как «Зеленая школа» (school.reo.ru) и «Разделяй с нами» (портал Экокласс.рф) для детей 1 -11 классов, «Помощники Земли» (reo.ru/pomoshchniki_zemli) для детей дошкольного возраста.

Для большинства взрослых в нашей стране сортировка отходов дело непривычное, для формирования привычки необходим комплексный подход. Примером

могут служить игровые форматы и массовые мероприятия, например в г. Москва проводятся экологические квизы, интерактивные игры, творческие конкурсы, привлекающие внимание к сортировке и детей, и взрослых. Экоакции «Начни с себя», такая акция проводится в одном из округов Санкт-Петербурга, в ходе которой жители могут сдать редкие виды вторсырья. Мобильный прием опасных отходов, когда экомобиль приезжает к жителям и принимает батарейки, ртутные лампы и пр. Такая акция важна для маломобильных граждан, а также для тех, кто не знает куда деть такие отходы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. List of Separation Methods Used to Divert Waste from Landfill and Recycle [Электронный ресурс] – The Wasters Blog. All Rights Reserved, 2020 – Доступ: <https://wastersblog.com/604/waste-separation-methods/>
2. Официальный сайт международной федерацией по переработке отходов Bureau of International Recycling [Электронный ресурс] – Доступ: <https://www.bir.org/the-industry/non-ferrous-metals>
3. Environment + Energy Leader. Extracting Metals from E-Waste Costs 13 Times Less Than Mining Ore [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.environmental-leader.com/2018/04/extracting-metals-e-waste/>
4. Паспорт национального проекта «Экология» [Электронный ресурс] – Доступ: <http://m.government.ru/info/35569/>.
5. Государственные доклады «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 -2024 г.г.» [Электронный ресурс] – Доступ: <http://www.mnr.gov.ru>
6. Официальный сайт Росприроднадзора <https://rpn.gov.ru/>.

© Н. В. Петрова, Д. В. Васендин, А. Д. Петров, 2026

О. А. Савченко^{1✉}, Н. Ф. Чуенко¹, М. В. Рева¹, А. Ю. Луговская²

Оценка влияния условий Арктической зоны, антиоксидантов и рациона питания в эксперименте на лабораторных животных

¹ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Роспотребнадзора,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: Savchenkooa1969@mail.ru

Аннотация. Сохранение здоровья и работоспособности лиц, трудящихся вахтовым методом в Арктической зоне, в условиях воздействия экстремальных климатогеографических факторов (низких температур, необычного фотопериодизма), остается актуальной гигиенической проблемой. Целью исследования явилась оценка влияния моделированных арктических условий на организм лабораторных животных и протективных эффектов рациона питания, обогащенного витаминами и минеральными веществами. В 28-суточном эксперименте на крысах линии «Вистар» моделировались условия «полярной ночи» и «полярного дня» при температуре +4...+6°C. Изучались поведенческие реакции, биохимические, гематологические показатели и морфология органов. Установлено, что комплексное воздействие холодового стресса и фотопериодических нарушений приводит к значительным негативным изменениям: развитию тревожности и когнитивных нарушений, индукции окислительного стресса, дислипидемии, инсулинорезистентности, гиперурикемии, нарушению функции печени и почек, дистрофическим изменениям в миокарде. Введение в рацион специализированного продукта («Концентрат «Арктик ТРОФИ»), содержащего сбалансированный комплекс витаминов и микроэлементов, продемонстрировало выраженный стресс-протективный и антиоксидантный эффекты. Отмечалось улучшение поведенческих показателей, нормализация лейкопоза, снижение уровня кортизола и глюкозы, улучшение липидного профиля и функциональных проб печени, уменьшение выраженности морфологических повреждений органов. Полученные данные обосновывают необходимость обогащения рациона питания работников Арктики антиоксидантами и эссенциальными нутриентами для коррекции алиментарно-зависимых состояний и профилактики профессиональных рисков.

Ключевые слова: Арктическая зона, холодовой стресс, фотопериодизм, лабораторные животные, витамины, минеральные вещества, антиоксиданты, окислительный стресс, протективное питание

O. A. Savchenko^{1✉}, N. F. Chuenko¹, M.V. Reva¹, A.Y. Lugovskaya²

Evaluation of the influence of Arctic zone conditions, antioxidants and diet in an experiment on laboratory animals

¹Federal Budgetary Institution “Novosibirsk Research Institute of Hygiene” of Rospotrebnadzor,
Novosibirsk, Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: Savchenkooa1969@mail.ru

Abstract. Maintaining the health and working capacity of shift workers in the Arctic zone under the influence of extreme climatic and geographical factors (low temperatures, unusual photoperiodism)

remains an urgent hygienic problem. The aim of the study was to assess the impact of simulated Arctic conditions on the body of laboratory animals and the protective effects of a diet enriched with vitamins and minerals. In a 28-day experiment on Wistar rats, conditions of "polar night" and "polar day" were modeled at a temperature of +4...+6°C. Behavioral reactions, biochemical, hematological parameters and organ morphology were studied. It has been established that the combined effect of cold stress and photoperiodic disorders leads to significant negative changes: the development of anxiety and cognitive impairments, induction of oxidative stress, dyslipidemia, insulin resistance, hyperuricemia, impaired liver and kidney function, dystrophic changes in the myocardium. The introduction of a specialized product ("Arctic TROPHY Concentrate") containing a balanced complex of vitamins and microelements into the diet demonstrated a pronounced stress-protective and antioxidant effect. There was an improvement in behavioral indicators, normalization of leukopoiesis, a decrease in cortisol and glucose levels, improvement of the lipid profile and liver function tests, and a decrease in the severity of morphological organ damage. The obtained data substantiate the need to enrich the diet of Arctic workers with antioxidants and essential nutrients to correct nutrition-dependent conditions and prevent occupational risks.

Keywords: Arctic zone, cold stress, photoperiodism, laboratory animals, vitamins, minerals, antioxidants, oxidative stress, protective nutrition

Введение

Освоение Арктической зоны Российской Федерации сопряжено с работой значительного контингента лиц вахтовым методом в условиях воздействия комплекса экстремальных факторов. Помимо низких температур, ключевое негативное влияние оказывает нарушение циркадных ритмов, обусловленное явлениями «полярного дня» и «полярной ночи» [1]. Данные факторы индуцируют развитие холодового и светового десинхроноза, что приводит к глубоким метаболическим, нейроэндокринным и поведенческим нарушениям, снижению иммунной резистентности и формированию «северного» гипо- и авитаминоза [2, 3]. Особую роль в патогенезе данных состояний играет индукция окислительного стресса с истощением запасов эндогенных антиоксидантов [4]. В этой связи разработка и научное обоснование специализированных рационов питания, сбалансированных по витаминно-минеральному составу и обладающих антиоксидантной активностью, является актуальной задачей гигиены питания и профилактической медицины [5, 6].

Целью исследования явилась комплексная оценка влияния моделированных условий Арктики на организм лабораторных животных и изучение протективных эффектов диеты, обогащенной витаминами и минеральными веществами.

Методы и материалы

Аналитические, токсикологические, гигиенические и статистические методы исследования. Объектом исследования явились результаты оригинальных исследований по изучению влияния диоксида углерода на организм человека, поиск возможных путей нормирования содержания диоксида углерода в окружающей среде, для снижения его воздействия на организм человека.

Результаты

Поведенческие реакции: у крыс группы К1 в условиях «полярного дня» отмечалось резкое снижение ориентировочно-исследовательской и двигательной

активности на фоне роста тревожности, что коррелировало с максимальным снижением уровня мелатонина. В группах Э1 и Э2, особенно в Э2, данные нарушения были выражены значительно меньше.

Гематологические и биохимические показатели:

Лейкопоз: в условиях «полярной ночи» в группе К1 развивалась выраженная лейкопения ($9,3 [6,6; 12,4] \times 10^9/\text{л}$), тогда как в группах Э1 и Э2 показатели сохранялись в пределах нормы. В «полярный день» лейкопения отмечалась во всех опытных группах, но была менее выражена в Э2.

Система стресса и метаболизм: в группе К1 в «полярный день» зафиксирован пик уровня кортизола ($8,8 [8,1; 9,46]$ нг/мл) и развивалась выраженная гипергликемия ($14,6 [14,4; 16,2]$ ммоль/л), свидетельствующая об инсулинорезистентности. В группах Э1 и Э2 уровни кортизола и глюкозы были достоверно ниже, приближаясь к показателям группы К2.

Липидный обмен и функция печени: на фоне стресса у животных группы К1 отмечалась гипополипидемия и тенденция к повышению активности АЛАТ и АСАТ. Прием витаминного комплекса (Э2) способствовал нормализации уровня холестерина ($1,63 [1,39; 1,79]$ ммоль/л против $1,57 [1,16; 1,67]$ в К1) и значимому снижению активности АЛАТ.

Показатели азотистого обмена: во всех группах в арктических условиях отмечено повышение уровня мочевины и мочевой кислоты, максимальное – в группе К1.

Морфологические изменения. Гистологическое исследование выявило наиболее тяжелые поражения в группе К1: дистрофия и некроз гепатоцитов, эритроцитарные тромбы в сосудах миокарда и почек, дистрофия кардиомиоцитов и эпителия канальцев почек. В группах Э1 и Э2 повреждения были менее выражены. В печени животных группы Э2 отмечалось появление двуядерных гепатоцитов, что свидетельствует о запуске репаративных процессов.

Анализ мочи. У крыс группы К1 наблюдалась значительная лейкоцитурия, эритроцитурия и протеинурия. В группах, получавших витаминный комплекс (особенно Э2), эти показатели были существенно ниже.

Обсуждение

Проведенный эксперимент наглядно демонстрирует, что сочетанное воздействие хронического холодового стресса и фотопериодических нарушений, моделирующих условия Арктики, является мощным патогенетическим фактором, приводящим к полисистемным сбоям в организме лабораторных животных. Полученные данные согласуются с результатами исследований, указывающими на высокую распространенность метаболических, сердечно-сосудистых и иммунных нарушений у жителей арктических регионов [1, 7, 8].

Ключевым звеном выявленных нарушений является индукция окислительного стресса и дисфункция митохондрий, ведущая к энергетическому дефициту и повреждению клеток по механизмам апоптоза и ферроптоза [4]. Это подтверждается биохимическими (гипергликемия, гиперурикемия) и морфологическими (дистрофия паренхиматозных органов) маркерами.

Введение в рацион специализированного продукта, обогащенного витаминами (С, Е, группы В) и минералами (Zn, Fe, I), продемонстрировало комплексный протективный эффект. Наблюдалось снижение активности гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы (снижение кортизола), улучшение чувствительности к инсулину, нормализация липидного профиля и функциональных проб печени. Антиоксидантные компоненты рациона способствовали снижению интенсивности перекисного окисления липидов, что проявилось в уменьшении цитолиза гепатоцитов и улучшении гистологической картины органов. Положительная динамика в показателях мочи указывает на нефропротективное действие. Данные результаты коррелируют с выводами других исследований о важности коррекции микронутриентного статуса для адаптации к условиям Севера [5, 6, 9].

Особого внимания заслуживает выявленное влияние фотопериодизма. Более тяжелые нарушения в условиях «полярного дня» связаны, вероятно, с подавлением синтеза мелатонина – ключевого хронобиотика и эндогенного антиоксиданта [4]. Это обосновывает перспективность дополнительного применения мелатонина или его агонистов в схемах профилактики для работников Арктики в летний период.

Заключение

Экспериментально подтверждено, что длительное пребывание в условиях, моделирующих арктические (низкая температура +4...+6°C, режимы «полярной ночи» и «полярного дня»), вызывает у лабораторных животных комплекс тяжелых патофизиологических изменений: поведенческие расстройства, активацию системного стресса, развитие инсулинорезистентности, дислипидемии, нарушение функции печени и почек на фоне индукции окислительного стресса.

Рацион питания, обогащенный сбалансированным комплексом витаминов и минеральных веществ («Концентрат «Арктик ТРОФИ»), обладает выраженным стресс-протективным, антиоксидантным и органопротективным действием, существенно нивелируя негативные эффекты арктических условий.

Полученные данные служат научным обоснованием для обязательной коррекции рациона питания работников вахтового метода в Арктической зоне путем включения специализированных продуктов, покрывающих повышенную физиологическую потребность в витаминах-антиоксидантах (С, Е), витаминах группы В и эссенциальных микроэлементах (Zn, Fe, I).

Для усиления защиты в условиях «полярного дня» целесообразно рассмотреть возможность дополнительного применения мелатонина. Внедрение регулярного мониторинга нутриентного статуса и показателей окислительного стресса в программы диспансеризации арктических трудящихся будет способствовать ранней профилактике алиментарно-зависимых заболеваний и сохранению здоровья трудового потенциала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корчин В.И., Корчина Т.Я., Терникова Е.М., Бикбулатова Л.Н., Лапенко В.В. Влияние климатогеографических факторов Ямало-Ненецкого автономного округа на здоровье

- населения (обзор) // Журнал медико-биологических исследований. – 2021. – Т. 9, № 1. – С. 77-88. – DOI: 10.37482/2687-1491-Z046.
2. Andronov S.V., Lobanov A.A., Bichkaeva F.A., Popov A.I., Fesyun A.D., Mukhina A.A., Rachin A.P., Kochkin R.A., Lobanova L.P., Bogdanova E.N., Shaduyko O.M., Nikitin M.V. [Traditional nutrition and demography in the Arctic zone of Western Siberia] // Vopr Pitan. – 2020. – Vol. 89(5). – P. 69-79. – DOI: 10.24411/0042-8833-2020-10067.
3. Lebedeva U.M., Sadykova R.N., Lebedeva A.M., Mingazova E.N. [The natality and mortality of population in various social economic regions of the Far North] // Probl Sotsialnoi Gig Zdravookhranennii Istor Med. – 2022. – Vol. 30(3). – P. 407-414. – DOI: 10.32687/0869-866X-2022-30-3-407-414.
4. Результаты экспериментального изучения протективного воздействия комплекса витаминов и минеральных веществ на морфологическое состояние органов-мишеней лабораторных животных в моделированных условиях Арктической зоны / М. В. Семенихина, И. И. Новикова, С. П. Романенко [и др.] // Медицина труда и экология человека. – 2024. – № 3(39). – С. 92-112. – DOI: 10.24412/2411-3794-2024-10306.
5. Sobolev N., Ellingsen D.G., Belova N., Aksenov A., Sorokina T., Trofimova A., Varakina Y., Kotsur D., Grjibovski A.M., Chashchin V., Bogolitsyn K., Thomassen Y. Essential and non-essential elements in biological samples of inhabitants residing in Nenets Autonomous Okrug of the Russian Arctic // Environ Int. – 2021. – Vol. 152. – Art. 106510. – DOI: 10.1016/j.envint.2021.106510.
6. Sorokina T., Sobolev N., Belova N., Aksenov A., Kotsur D., Trofimova A., Varakina Y., Grjibovski A.M., Chashchin V., Korobitsyna R., Thomassen Y. Diet and Blood Concentrations of Essential and Non-Essential Elements among Rural Residents in Arctic Russia // Nutrients. – 2022. – Vol. 14(23). – Art. 5005. – DOI: 10.3390/nu14235005.
7. Little M., Hagar H., Zivot C., Dodd W., Skinner K., Kenny T.A., Caughey A., Gaupholm J., Lemire M. Drivers and health implications of the dietary transition among Inuit in the Canadian Arctic: a scoping review // Public Health Nutr. – 2021. – Vol. 24(9). – P. 2650-2668. – DOI: 10.1017/S1368980020002402.
8. Howell B.M. Interactions Between Diet, Physical Activity, and the Sociocultural Environment for Older Adult Health in the Urban Subarctic // J Community Health. – 2020. – Vol. 45(2). – P. 252-263. – DOI: 10.1007/s10900-019-00737-3.
9. Результаты экспериментального изучения протективных свойств витаминов и минеральных веществ в условиях, приближенных к Арктической зоне / М. В. Семенихина, О. А. Савченко, П. А. Вейних [и др.] // Вопросы питания. – 2023. – Т. 92, № S5(549). – С. 183. – DOI: 10.33029/0042-8833-2023-92-5s-225.

© О. А. Савченко, Н. Ф. Чуенко, М. В. Рева, А. Ю. Луговская, 2026

И. Г. Фютик^{1✉}, О. В. Колодяжная¹

Формирование логистических хабов в России и их влияние на состояние окружающей среды

¹Сибирский государственный университет водного транспорта,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ina_f@mail.ru

Аннотация. В последние годы в России активно обсуждается и реализуется концепция формирования крупных логистических хабов (специализированных центров, объединяющих различные виды транспорта, складские комплексы и сопутствующие услуги). Эти хабы призваны оптимизировать грузопотоки, сократить транзитное время и стоимость перевозок, а также повысить конкурентоспособность отечественных товаров на мировом рынке. Однако, наряду с очевидными экономическими выгодами, развитие логистических хабов оказывает и заметное воздействие на окружающую среду. Увеличение интенсивности транспортных потоков, связанное с работой хабов, неизбежно ведет к росту выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, шумовому загрязнению и увеличению потребления невозобновляемых источников энергии. Кроме того, строительство крупных объектов инфраструктуры может приводить к фрагментации естественных ландшафтов, сокращению биоразнообразия и изменению гидрологического режима территорий. Поэтому особую озабоченность вызывает потенциальное увеличение нагрузки на экосистемы в районах размещения транспортно-логистических хабов. В этой связи, при планировании и реализации таких проектов, крайне важно уделять должное внимание экологическим аспектам, внедрять современные технологии для минимизации негативного воздействия, а также проводить комплексную оценку воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: транспортно-логистические центры, водный транспорт, окружающая среда

I. G. Fyutik^{1✉}, O. V. Kolodyazhnaya¹

The formation of logistics hubs in Russia and their impact on the environment

¹Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ina_f@mail.ru

Abstract. In recent years, the concept of forming large logistics hubs (specialized centers combining various types of transport, warehouse complexes and related services) has been actively discussed and implemented in Russia. These hubs are designed to optimize cargo flows, reduce transit time and cost of transportation, and increase the competitiveness of domestic goods on the global market. However, along with the obvious economic benefits, the development of logistics hubs has a significant impact on the environment. An increase in the intensity of traffic flows associated with the operation of hubs inevitably leads to an increase in emissions of pollutants into the atmosphere, noise pollution and an increase in the consumption of non-renewable energy sources. In addition, the construction of large infrastructure facilities can lead to fragmentation of natural landscapes, reduction of biodiversity and changes in the hydrological regime of territories. Therefore, the potential increase in the load on ecosystems in areas where transport and logistics hubs are located is of particular concern. In this regard, when planning and implementing such projects, it is extremely important to

pay due attention to environmental aspects, introduce modern technologies to minimize negative impacts, and conduct a comprehensive environmental impact assessment.

Keywords: transport and logistics centers, water transport, environment

Введение

На современном этапе состояния и развития глобальной социально-экономической системы особенно влияющими факторами выступают политическое и экономическое взаимодействие субъектов и экологические аспекты устойчивого развития стали уходить на второй план. При этом элементы окружающей среды включаются в управленческий процесс как часть комплексной оценки [1]. Создание транспортно-инфраструктурного хаба, как логистического транспортного узла, объединяющего наземные и водные виды транспорта способствует оптимизации грузопотоков и снижению глобальных издержек. Однако их строительство и эксплуатация могут оказывать как негативное, так и позитивное воздействие на окружающую среду [2].

Также важно отметить, что модель развития каждого хаба и характеристика его инфраструктуры обладают определенными особенностями, связанными с направлениями грузовых потоков, аспектами обработки грузов, а главное исторической целью создание такого логистического центра [3].

Россия по своим территориальным масштабам характеризуется экономико-географическими и природно-национальными аспектами окружающей среды, что в целях оценки потенциальной эффективности её использования требует оптимизационной научно-исследовательской проработки.

Методы и материалы

Развитие транспортно-логистической системы страны напрямую связано с реализацией проектов по строительству крупных транспортных комплексов и особую роль в этом играют мультимодальные транспортные хабы [4]. Активизация данных процессов основана на создании интегрированных логистических узлов в системе смешанных перевозок, обеспечивающих эффективную и бесперебойную, а также достаточно конкурентоспособную сферу деятельности транспортной отрасли.

В соответствии с «Транспортной стратегией РФ» утвержденной распоряжением Правительства РФ №3363-р, долгосрочные цели развития транспортной системы страны заключаются: в повышении пространственной связанности и доступности территорий, увеличении объёма и скорости транзита грузов и развитие мультимодальных логистических технологий, а также цифровой и низкоуглеродной трансформации отрасли [5].

В соответствии с поставленными целями Росморречфлотом [6] осуществляется планирование и создание речных хабов в Амурской, Омской, Саратовской, Самарской, Московской и Пермской областях (рисунок 1).



Рис. 1. Схема размещения формируемых Росморречфлотом РФ речных хабов [7]

Изначально, еще в 2024 году, предполагалось, что эти транспортно-логистические центры (ТЛЦ) будут развернуты на базе уже существующих, хотя порой и недостаточно используемых, речных портов. Каждый проект имеет свои географические и экономические особенности:

1. В Омской области планируется устранить судоходные ограничения на внутренних водных путях, улучшить подходные каналы к центральным причалам «Омского речного порта» и «Омского причала», а также повысить их пропускную способность путем реконструкции портовой инфраструктуры. Этот проект предусматривает переориентацию грузов с железнодорожного и автомобильного транспорта на водный, акцентируя внимание на развитии контейнерных перевозок в Обь-Иртышском бассейне и формировании транзитного коридора между Россией, Казахстаном и Китаем [8].

2. В Амурской области рассматривается создание логистического центра на базе речного порта Джалинда (рисунок 2). Разработана «дорожная карта» проекта, включающая такие проектные мероприятия имеющие и экологические аспекты, как урегулирование земельных вопросов, строительство железнодорожных подходов к речной инфраструктуре и углубление дна для увеличения габаритов судоходного пути. Проект также включает модернизацию пункта смешанных перевозок и возможность круглогодичной работы пограничного перехода Джалинда-Мохэ (Китай) с использованием паромных и понтонных переправ в навигацию и ледовых путей зимой [9].



Рис. 2. Проект ТЛЦ Джалинда

3. В САХА (Якутия) по инициативе Ленского речного пароходства и при государственной поддержке осуществляется проект строительство терминала в поселке Нижний Бестях, где поэтапно представляется строительство причальной набережной, нефтекомплекса и ветки железнодорожной пути (рисунок 3).



Рис. 3. Грузовой терминал в Нижних Бестях (Амурская область)

3. В Пермском крае рассматривались ООО «Порт Пермь» с его инфраструктурой для погрузо-разгрузочных работ (ПРР) и территорией в 30 гектаров, а также АО «Порт Камбарка», расположенный ниже по течению. Последний, используя глубоководную Каму и имея около 4 км железнодорожных путей, позволяет одновременно загружать до 80 вагонов, что обеспечивает бесперебойный прием судов класса «река-море» и интегрированные смешанные перевозки [10].

4. Мультиmodalный транспортный узел (МТУ) в Московской области планируют создать на базе речного порта в Дмитровском городском округе в

Татищевском уширении «Канала имени Москвы». Однако этот проект требует значительных инвестиций, включая строительство складских комплексов, укрепление береговой линии и обустройство ж/д подъездных путей. На территории площадью 100 га будут возведены причалы, разгрузочные площадки, склады, грузовые терминалы, а также вспомогательные помещения [11].

5. В Самарской области для портово-логистического хаба выбраны четыре потенциальные площадки: Самарский, Сызранский и Тольяттинский речные порты, а также территория бывшего Октябрьского комбината стройматериалов. Тем не менее, на текущий момент реализация проекта мультимодального транспортно-логистического центра началась на базе действующего нефтяного терминала «Октябрьск» [11].

6. Среди возможных локаций для транспортно-логистического хаба рассматривался и Саратов. Однако, после оценки состояния портовой инфраструктуры региона, пропускной способности судоходных путей, потенциальных объемов и прогнозируемой номенклатуры грузов, окончательное решение пока не принято. Но предлагается рассмотреть возможность размещения МЛЦ на территории порта Балаково и станции Князевка, располагающейся недалеко от Саратовского нефтеперерабатывающего завода.

Создание таких хабов призвано объединить водный транспорт (включая внутренние водные пути и морские перевозки) с железнодорожным и автомобильным, что должно привести к увеличению объемов грузоперевозок по внутренним водным путям, облегчить нагрузку на железнодорожные магистрали и способствовать развитию международных транспортных коридоров.

Результаты

Следствием любого строительства и транспортно-производственной деятельности, включая создание транспортно-логистических центров, является негативное влияние на окружающую среду, и прежде всего:

1)загрязнение воздуха, воды и почвы, заключающееся в выбросах от транспортных средств, работающих на ископаемом топливе (оксиды углерода, серы, азота, сажа), сбросах сточных вод от складов, терминалов и других объектов хабов, загрязнении почвы при использовании химических веществ [12];

2)шумовое и вибрационное загрязнение, создаваемое постоянным потоком транспорта, негативно сказывается на здоровье людей и экосистемах [13];

3)нарушение экосистем при возведении хабов и сопутствующей инфраструктуры, связанное с вырубкой деревьев, повреждением почвенного покрова и изменением гидрологического режима;

4)увеличение объёмов твёрдых отходов, так как логистические операции генерируют отходы от упаковки, материалов и оборудования, и требуют рациональной утилизации;

5)риски аварий, проявляющихся при транспортировке опасных грузов (нефти и различных химических веществ) повышает вероятность утечек, взрывов и других инцидентов, наносящих ущерб природе [14].

Но в то же время можно отметить позитивные аспекты и возможности

снижения экологического воздействия при формировании мультимодальных транспортно-логистических центров:

1) оптимизация маршрутов при использовании цифровых технологий (Big Data, IoT, ИИ) для планирования маршрутов помогает сократить пробег транспорта, уменьшить количество холостых рейсов и снизить расход топлива [15];

2) мультимодальность перевозок, проявляющаяся в комбинировании разных видов транспорта позволяет снизить нагрузку на автодороги и уменьшить выбросы по сравнению с чисто автомобильными перевозками, а также стать альтернативой перегруженным железным дорогам;

3) переход на экологичные виды транспорта, включающие внедрение электромобилей, газомоторного транспорта, водородных и гибридных двигателей снижает выбросы вредных веществ [16];

4) использование возобновляемых источников энергии, которое происходит при установке солнечных панелей на складских зданиях, ветровых установок на крупных хабах или применение водородных технологий для транспорта;

5) экологичная упаковка и рециклинг (активно внедряемые в процессы) позволяют использовать для упаковки перерабатываемые или биоразлагаемые материалы, а также применять системы сбора и переработки отходов;

6) энергоэффективность, выражающаяся во внедрении LED-освещения и технологий управления энергией, снижающих ресурсопотребление;

7) экологический аудит и учёт, осуществляемые в современных системах обязательного контролинга деятельности, проводят оценку экологического воздействия логистических систем на всех этапах их функционирования, что позволяет выявлять и устранять негативные воздействия на окружающую среду.

То есть важно осознавать, что окружающая природная среда является ключевым фактором экономического роста и устойчивого развития, но в то же время её загрязнение имеет серьезные негативные последствия [17].

Обсуждение

Логистические хабы в России играют важную роль в развитии экономики, но их влияние на окружающую среду неоднозначно. При грамотном подходе можно минимизировать негативные последствия, и ключевыми направлениями становятся мультимодальность, цифровизация, переход на экологичный транспорт и государственная поддержка экологичных инициатив. Однако для этого требуется дальнейшее развитие инфраструктуры для альтернативных видов топлива, повышение экологической ответственности бизнеса и усиление государственного регулирования. В качестве примеров можно рассмотреть:

– запуск Федерального проекта «Чистый воздух», который стимулирует предприятия к внедрению экологичных технологий [18];

– российские компании участвуют в государственных экспериментах по ограничению выбросов парниковых газов;

– с 2026 года на импортёров распространяются требования трансграничного углеродного налогообложения [19];

- в России действует экологический стандарт «Евро-5», регулирующий содержание вредных веществ в выхлопных газах транспортных средств [10];
- современное применение методов предиктивного моделирования в модуле «Green Logistics», как программной платформе, разработанной в целях повышения экологической устойчивости логистических процессов [21].

Заключение

Создание эффективной транспортно-логистической сети признано одним из основных драйверов экономического прогресса страны. В России активно продвигается идея формирования масштабных логистических центров [22], представляющих собой объединенные узлы различных видов транспорта, складские мощности и сопутствующие сервисы. Целью таких центров является оптимизация перемещения грузов, ускорение транзита и снижение транспортных издержек, что, в свою очередь, повысит конкурентоспособность отечественной продукции на мировой арене. Вместе с тем, наряду с экономическими преимуществами, развитие логистических хабов несет существенные экологические риски. Увеличение интенсивности транспортных потоков, обусловленное работой этих центров, неизбежно ведет к усилению загрязнения атмосферы, росту шумового фона и увеличению потребления невозобновляемой энергии. Кроме того, строительство крупной инфраструктуры может фрагментировать природные ландшафты, снижать биоразнообразие и нарушать водный баланс территорий [23].

Поэтому при планировании и реализации проектов логистических хабов необходимо уделять пристальное внимание экологическим аспектам, внедрять передовые технологии для минимизации негативного воздействия и проводить тщательную оценку состояния окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Elements of geoeological environmental audit and accounting / N. Ilias, E. Dunca, Iu. Offenbergh [et al.] // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2021. – No. 3-1. – P. 359-371. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_31_0_359.
2. Гылыжова, М. Строительство и охрана окружающей среды / М. Гылыжова, А. Ишангулыев, Д. Хайдов // Вестник науки. - 2024. - №9 (78). - URL: <https://cyberleninka.ru/> (дата обращения: 12.05.2026).
3. Тимофеев, С. В. Создание логистического центра - инновационный путь развития потребительской кооперации / С. В. Тимофеев // Вестник Российского университета кооперации. – 2014. – № 4(18). – С. 4-10. – EDN TVSRVD.
4. Темирбеков, Ж. Разработка рекомендаций по формированию и технологии функционирования транспортно-логистических центров / Ж. Темирбеков // Вестник НГИЭИ. – 2016. – № 6(61). – С. 99-104. – EDN WDZLKH.
5. Белозерцева, Н. П. Перспективы применения цифровых логистических платформ в мультимодальных перевозках / Н. П. Белозерцева, А. Р. Блюдик, А. В. Несповитый // Финансовые рынки и банки. – 2024. – № 12. – С. 540-547. – EDN AILULD.
6. В Росморречфлоте планируют построить шесть речных хабов к 2027 году. – URL: <https://www.interfax.ru/business/983459> (дата доступа 15.05.2026).
7. Где в России будут построены мультимодальные речные хабы? – URL: <https://paluba.media/news/182899> (дата доступа 16.05.2026).
8. Чубар С. В Омской области создадут транспортно-перегрузочные хабы на базе речных

портов - АБН 24. – URL: <https://abnews.ru/siberia/news/omsk/> (дата доступа 16.05.2026).

9. Утверждена «дорожная карта» создания логистического центра на базе речного порта Джалинда // Морские вести России. – URL: <https://morvesti.ru/news/1679/117843/> (дата доступа 16.05.2026).

10. Согласована дорожная карта по развитию речных хабов в Пермском крае и Удмуртской Республике - Морские вести России. – URL: <https://morvesti.ru/news/1679/115870/> (дата доступа 16.05.2026).

11. Концепция мультимодальных хабов: реализация в России // Главпортал. – URL: <https://glavportal.com> (дата доступа 16.05.2026).

12. Бочкарева, И. И. Обеспечение экологической безопасности портов и причалов / И. И. Бочкарева, Д. В. Быков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2024. – № 1. – С. 228-231. – EDN MJOOVP.

13. Лисакова, О. А. Оценка шумового воздействия от автотранспорта в комплексной диагностике состояния городских территорий / О. А. Лисакова, И. И. Бочкарева, Л. К. Трубина // Естественные и технические науки. – 2024. – № 11(198). – С. 85-90. – DOI 10.25633/ETN.2024.11.05. – EDN VJJYEL.

14. Познякова, Е. А. Влияние транспорта на загрязнение окружающей среды / Е. А. Познякова, О. В. Рослякова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2025. – № 3. – С. 123-129. – EDN JTEENQ.

15. Yulin, N. The impact of the digital economy on the development of the transport industry / N. Yulin, L. V. Grintsevich // Vestnik of Brest State Technical University. – 2024. – No. 3(135). – P. 135-138. – DOI 10.36773/1818-1112-2024-135-3-135-138. – EDN OIKRKN.

16. Жердева, Е. В. Анализ энергетической эффективности СЭУ при использовании биодизельного топлива / Е. В. Жердева, Б. О. Лебедев, О. В. Рослякова // Транспортное дело России. – 2025. – № 1. – С. 127-129. – EDN QTJBEG.

17. Фюттик, И. Г. Мониторинг компонентов устойчивого развития на предприятиях воднотранспортной отрасли / И. Г. Фюттик, О. В. Колодяжная // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2025. – Т. 3. – С. 227-234. – DOI 10.33764/2618-981X-2025-3-227-234. – EDN MNJNEA.

18. Заменин, Н. А. Повышение экологичности логистических процессов компании // Система управления экологической безопасностью. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2025. – С. 218-223.

19. Иванов, Ю. Зеленая логистика становится драйвером конкурентоспособности // Ведомости. – URL: <https://www.vedomosti.ru/2026/05/13/>. (дата доступа 16.05.2026).

20. Логистические риски в цепи поставок: воздействие на окружающую среду / Е. В. Кобылина, Ю. А. Штыкова, В. В. Байдала, Ж. А. Саркисян // Российский экономический интернет-журнал. – 2023. – № 2. – EDN WJZLLM.

21. Saydulloev, I. I. Method of predictive modeling using neural network in Green Logistics platform / I. I. Saydulloev // Polytechnic Bulletin. Series: Intelligence, Innovation, Investments. – 2025. – No. 4(72). – P. 42-49. – DOI 10.65599/FHKT8665. – EDN MKLUSE.

22. Журавель, В. П. Трансарктический транспортный коридор: политико-экономический и стратегический потенциал для России / В. П. Журавель, С. Н. Гриняев // Арктика и Север. – 2025. – № 60. – С. 135-151. – DOI 10.37482/issn2221-2698.2025.60.135. – EDN COYHXC.

23. Adoption of green inbound logistics practices: the role of internal environmental communication and organizational environmental governance / Sh. Namagembe, Sh. Nantumbwe, W. Tusiime [et al.] // Modern Supply Chain Research and Applications. – 2025. – Vol. 7, No. 1. – P. 102-123. – DOI 10.1108/mscra-06-2024-0020. – EDN WZTEUL.

© И. Г. Фюттик, О. В. Колодяжная, 2026

И. И. Бочкарева^{1✉}, В. П. Зайцев^{1,2}

Экологические проблемы урбанизированных территорий

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация,

²Сибирский государственный университет водного транспорта,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: family_i@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются экологические проблемы урбанизированных территорий на примере городов Новосибирской области и г. Новосибирска. Описываются типовые изменения естественной среды, произошедшие из-за негативного воздействия антропогенной деятельности: ухудшение качества атмосферного воздуха, засорение почв, попадание загрязнений в водные объекты. Помимо этих проблем, описаны примеры параметрических загрязнений, таких как акустическое загрязнение и образование «тепловых островов» над городами. Отмечено, что на психоэмоциональное состояние человека также влияет качество визуальной среды городского пространства, ее монотонность или, напротив, агрессивность. В работе описаны основные пути улучшения экологической обстановки городов. Это меры, способные привести к снижению уровня физико-химического загрязнения среды, а также способы повышения визуального комфорта общественных пространств.

Ключевые слова: город, экология, экологические проблемы, комфортная среда

I. I. Bochkareva^{1✉}, V. P. Zaitsev^{1,2}

Environmental problems of urbanized territories

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation,

²Siberian state University of water transport, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: family_i@mail.ru

Abstract. The article discusses the environmental problems of urbanized territories on the example of the cities of the Novosibirsk Region and Novosibirsk. It describes typical changes in the natural environment caused by the negative impact of anthropogenic activities, such as the deterioration of atmospheric air quality, soil contamination, and the introduction of pollutants into water bodies. In addition to these problems, the article also discusses examples of parametric pollution, such as acoustic pollution and the formation of "heat islands" over cities. It is noted that the quality of the visual environment in urban spaces, as well as its monotony or aggression, can also affect a person's psychoemotional state. The paper describes the main ways to improve the environmental situation in cities. These are measures that can lead to a decrease in the level of physical and chemical pollution, as well as ways to increase the visual comfort of public spaces.

Keywords: city, ecology, environmental problems, comfortable environment

Половина населения Земли проживает в городах, некоторые из которых имеют численность в миллионы человек. Урбанизация привела к колоссальным изменениям в окружающей среде, полностью уничтожив первоначальные природные

условия в местах поселений. Строительство жилищ и иных сооружений, прокладывание коммуникаций, создание систем связи, получение энергии и другие действия создают комфорт для жизнедеятельности человека, но имеет обратную, негативную, сторону.

Цель данной работы – рассмотреть отдельные экологические проблемы крупных городов.

Общеизвестно, что любое поселение функционирует, как сложно устроенная система, объединяющая две составляющие – естественную и созданную человеком. Внутри этих составляющих, а также между ними происходит постоянный обмен веществами и энергией, что приводит к различного рода изменениям, в том числе, изменениям природной среды города: состава грунта, воздуха, подземных вод и водоёмов, растительного и животного мира.

От масштаба и интенсивности антропогенного и технического воздействия зависит экологическая обстановка в урбоэкосистеме [1].

Общеизвестны типовые экологические проблемы городов.

В первую очередь, это загрязнение атмосферы. В городах сосредоточено большое количество промышленных производств, предприятий теплоэнергетического комплекса, а также транспорта. В отдельных населенных пунктах все еще остается много частного сектора, использующего печное отопление. В поселениях Новосибирской области в 2024 г 38% выбросов приходилось на тепло- и энергообеспечивающие предприятия. Около 32% пришлось на выбросы автомобильного транспорта. Остальные – на объекты негативного воздействия на ОС, имеющие источники выбросов загрязняющих веществ. Суммарные объемы выбросов в городах составляют десятки и даже сотни тонн, в Новосибирской области в 2024 г выброшено 280 тыс. тонн загрязняющих веществ, из них от стационарных источников – 191 тыс. тонн, от передвижных – 89 [2].

Не смотря на экологические ограничения выбросов, которые обязаны выполнять производства, на требования к транспортным средствам, в воздухе городов присутствует большое количество аэрозолей, в том числе, мелкодисперсных частиц. Автомобильный транспорт дает 70-80% газового загрязнения в Новосибирской области, немногим более трети всех выбросов дают промышленные предприятия. Они вносят вклад в содержание таких высокоопасных веществ, как формальдегид, бензапирен и другие. Стационарные источники выбрасывают, в первую очередь диоксид серы (33 тыс. тонн), оксиды азота, углерода (47 тыс. тонн) и взвешенные вещества (41 тыс. тонн), автомобили те же вещества, а также сажу, метан, аммиак, органические летучие соединения [2].

Большое количество отходов, среди которых лидируют твердые коммунальные отходы (ТКО) становятся загрязнителями почв и водных объектов. По данным федерального статистического наблюдения в 2024 году на территории Новосибирской области образовалось 241,8 млн тонн отходов. К сожалению, проводимых реформ недостаточно для решения проблемы отходов, поэтому в окружающую среду попадает микропластик, токсичные вещества и органика, пищевые отходы, привлекающие, в свою очередь насекомых и грызунов, а также способствующие распространению патогенных микроорганизмов [2, 3].

Организованные стоки предприятий и неорганизованный сброс неочищенных сточных вод с открытых поверхностей ухудшают качество воды водоемов, могут вызвать заморы рыбы и развитие патогенных микроорганизмов. На пунктах наблюдения за водными объектами в Новосибирской области в 2024 г. просматривалась динамика ухудшения качества воды в 50% пунктов, в 46% состояние водных объектов стабильное. Следует отметить тенденцию увеличения концентрации тяжелых металлов, органических загрязнителей, определяемых по интегральным показателям химического потребления кислорода (ХПК) и биохимического потребления кислорода (БПК-5) и нитрит-ионов. Дефицит растворенного кислорода в водах Новосибирского водохранилища в 2024 г. наблюдался зимой и летом, как и повышенное значение БПК-5. Повышенное содержание общего железа и марганца в водных объектах региона первоначально имеет природное происхождение, но добавляется с промышленными стоками. Повышенные концентрации ионов аммония и нитритов, как правило, указывают на свежее загрязнение, которое могло попасть в водоем со сточными водами, несанкционированными стоками, коммунальными и промышленными отходами из-за ненадлежащего состояния водоохранной зоны в городской черте. В водных объектах, протекающих по территории поселений Новосибирской области и самого г. Новосибирска наблюдалось повышенное содержание нефтепродуктов, фенолов летучих, соединений азота (азота нитритного, азота аммонийного), железа общего, меди, марганца, цинка, алюминия [2,4].

Отдельным видом загрязнения является параметрическое загрязнение. В первую очередь это уровень электромагнитного фона в городе с его бесконечными источниками неионизирующего излучения. Это и электросети, в том числе транспортные, это вышки связи, теле- и радиовещания, радары аэропортов и другие.

Хорошо известна другая проблема – городской шум. Основой его является транспортный шум, а также шум производственный, электромагнитный, внутридомовых устройств, шум других источников (кафе, уличный гул, шум стадионов и пр.). Человек в городе большую часть суток находится в условиях высокого акустического фона, зачастую, с превышением допустимых значений.

Исследование шумового воздействия на городские территории в г. Новосибирске показали, что на участках непосредственно возле дороги интенсивность звукового потока достигает 80-82 дБА, хотя, согласно нормативам, уровень уличного шума не должен превышать 70 дБ в дневное время и 60 дБ в вечернее. Шум непосредственно у проезжей части может длиться продолжительное время, чаще круглосуточно, «час пик» может составлять 2-4 часов. Комфортная акустическая обстановка начинается в 150-200 метрах от дороги. Наиболее благоприятная ситуация ориентировочно находится в глубине жилых районов и в достаточном отдалении от оживленных транспортных путей [5].

В крупных городах формируются тепловые купола – зоны над городом с температурой, выше на несколько градусов, чем за городом. Кроме того, внутри купола могут образовываться дополнительные «островки тепла». Температурная неоднородность влияет на рассеивание аэрозолей, способствуя их накоплению в

приземных слоях атмосферы. Более высокая температура делает более доступной кормовую базу в зимнее время для грызунов, являющихся распространителями инфекций [6].

При перечислении экологических проблем городов часто забывают еще про один фактор, связанный с архитектурными особенностями. Речь идет о визуальном восприятии пространства человеком. Сегодня существуют такие понятия, как «монотонная визуальная среда», «агрессивная визуальная среда», «комфортная визуальная среда». Современные города стремятся к унификации пространства, при строительстве зачастую отказываются от архитектурных элементов, делая среду однородной, не обладающей никакой «характерностью», как говорят «глазу не за что зацепиться». Это усугубляется еще и сокращением зеленых насаждений, которые могли бы «разбавить» визуальный фон. Монотонные фасады, серые торцы зданий, глухие заборы, автодороги, пространства, заполненные однообразными постройками, пусть даже современными, монолитные стеклянные конструкции на домах лишают возможности найти «визуальную опору», что приводит к психологическому дискомфорту и раздражению.

Агрессивная визуальная среда, напротив, перенасыщена информацией, не несущей визуального интереса. Это могут быть геометрические структуры, дающие перегрузку своей бессмысленностью и также вызывающие дискомфорт восприятия [7].

В г. Новосибирске чаще встречаются территории с монотонной городской средой, чем с агрессивной. В качестве примера можно привести «спальные» микрорайоны с многоэтажными домами выше 5-6 этажей, возведенными, как правило, в 1990-2010 гг., такие, как Горский и Шевченковский жилмассивы, Родники, ул. 1905 г. и другие. Постройки 60-70 годов прошлого столетия отличались меньшей (4-5) этажностью и достаточным озеленением вокруг, а также детскими площадками, спортивными дворовыми сооружениями, которые скрадывали однообразность и унылость серого кирпича.

Сегодня уже говорим о комфортной городской среде. Ее неотъемлемой частью является приближение к естественной среде, где присутствуют природные ландшафты или их элементы. Большую роль здесь играет формирование водно-зеленых каркасов (ВЗК) городов, или интенсивное озеленение пространства при невозможности создания полноценного ВЗК. Сегодня архитекторы частично учли неудачный опыт строительного «бума» и современные микрорайоны стараются разнообразить цветом зданий, планировкой микропарков и аллей, скверов в междомовом пространстве. Архитектуре придается ключевое значение, она должна характеризоваться большим разнообразием элементов в пространстве, силуэтов, линий. Использование гармоничной цветовой гаммы, избегание как агрессивных, так и монотонных оттенков. Положительную роль в создании комфортной визуальной среды могут играть стрит-арты, граффити и монументальные изображения на стенах домов – муралы.

Для обеспечения комфортного визуального восприятия пространства уже сформулированы основные приемы:

1) Сохранение пространства, «подстраивание» под природный ландшафт архитектурные формы. Это довольно проблематично выполнить именно в городе, особенно, крупном, с давно сложившимися архитектурой и инфраструктурой. В этом случае как раз реализация концепции водно-зеленого каркаса, особенно упор на водные объекты, могла бы улучшить ситуацию.

2) При планировании учет соотношения человеческого роста с масштабами пространства: высотой зданий, строений и пр.

3) Сохранение замкнутости визуальной единицы ландшафта;

4) Сохранение естественной конфигурации зрительных объектов;

5) Сохранение гармоничности пространства: связи архитектуры и ландшафта.

6) Разнообразие цветовой гаммы.

7) Сгущение и разрежение видимых элементов и разная их удаленность.

8) Программирование впечатлений (например, прокладывание пешеходных или автомобильных путей по более интересному для визуализации маршруту.

9) Компенсационные меры («разнообразие» природной визуальной среды при ее монотонности: цветом, дополнительными элементами и др.) [7, 8].

Для улучшения экологической обстановки городов, повышения их комфортности для жителей, поддержания физического и психического здоровья людей необходимы постоянные меры, которые должны корректироваться по мере изменения актуальности проблем, развития технологий, расширения территорий поселений. К этим мерам относятся общеизвестные, такие, как:

- развитие общественного транспорта и снижение автомобильной нагрузки;

- модернизация очистных сооружений и ужесточение контроля за выбросами предприятий;

- расширение зелёных зон и экологическое планирование городской застройки;

- повышение уровня переработки отходов и внедрение раздельного сбора.

Улучшение экологической ситуации на урбанизированных территориях – комплексный, постоянный, «гибкий» процесс. Он должен включать как технологические приемы и инновации, так и изменение подходов к управлению ресурсами, обращению с отходами. Кроме того, нельзя вычеркивать из этих мер разнообразные подходы к благоустройству территорий, включающих как архитектурно-строительные приемы, так и озеленение пространств. Тогда город станет действительно комфортным для жизнедеятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беленко О.А., Трубина Л.К., Бочкарева И.И. Экологическая компонента как важная составляющая в рейтингах городов. / Естественные и технические науки, № 11. 2022. - С. 41-44

2. О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2024 году. – Новосибирск, 2025. – 208 с. <https://mpr.nso.ru/page/3736>

3. Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Новосибирской области.

Постановление правительства Новосибирской области от 26 сентября 2016 года N 292-п/
<https://docs.cntd.ru/document/465714347>

4. Фютик И.Г. Оценка влияния ресурсных рисков на результаты деятельности предприятия водного транспорта. / Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. 2009. Т.5. №4. С.43-46

5. Лисакова О.А., Бочкарева И.И., Трубина Л.К., Оценка шумового воздействия от автотранспорта в комплексной диагностике состояния городских территорий. Естественные и технические науки, № 11. 2024. С. 52-90

6. Гиясов А.И., Сокольская О.Н. Модель «острова тепла» урбанизированных территорий и его трансформация. Вестник МГСУ, т. 20, Выпуск 2. 2025. С.180-192./ <https://cyberleninka.ru/article/n/model-ostrova-tepla-urbanizirovannyh-territoriy-i-ego-transformatsiya/viewer>

7. Янушкина Ю.В. Визуально-кинестетическая экология публичных пространств современного города. Вести Волгоградского университета. Сер.7. 2014, № 3. С. 71-73/ <https://cyberleninka.ru/article/n/vizualno-kinesteticheskaya-ekologiya-publichnyh-prostranstv-sovremennogo-goroda/viewer>

8. Скабёлкина О.А., Довганюк А.И. Визуальная среда города и ее влияние на психофизическое состояние человека [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24282699>

© И. И. Бочкарева, В. П. Зайцев, 2026

И. М. Ламков^{1,2✉}, Д. В. Панов¹, Л. А. Головина³

К вопросу природоохранной деятельности на обводненных карьерах

¹Сибирский государственный университет водного транспорта,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Учебный центр федеральной противопожарной службы по Новосибирской области,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: igor.lamkov@ya.ru

Аннотация. Обводненные карьеры являются уникальными водными экосистемами и обладают высоким рекреационным потенциалом для урбанизированных территорий. Изучение опыта использования обводненных карьеров показал наличие спорных вопросов, связанных с получением права пользования водными объектами. Отмечаются случаи полного запрета использования населением обводненных карьеров. Выполнен обзор публикаций о природоохранных мероприятиях, проводимых для обводненных карьеров. Рассмотрены проблемы низкого качества воды карьера Юго-западного жилмассива города Новосибирска и мероприятия, направленные на улучшение экологической ситуации. Выявлено, что небольшая глубина в пляжной зоне в пределах 2–6 м способствует эвтрофикации водоема и снижению на этом участке его рекреационной ценности. На основе промеров глубин и натурных наблюдений построена карта-схема пляжной зоны водоема, рекомендована очистка участка дна водоема мини земснарядом.

Ключевые слова: обводненный карьер, охрана водных объектов, эвтрофикация

I. M. Lamkov^{1,2✉}, D. V. Panov¹, L. A. Golovina³

On the issue of environmental protection in flooded quarries

¹Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

²Training center of the Federal Fire Service in the Novosibirsk region,
Novosibirsk, Russian Federation

³Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: igor.lamkov@ya.ru

Abstract. Flooded quarries are unique aquatic ecosystems with high recreational potential for urbanized areas. A study of the experience of using flooded quarries revealed that there are controversial issues related to obtaining the right to use water objects. There have been cases of complete prohibition of the use of flooded quarries by the population. A review of publications on environmental protection measures for flooded quarries has been performed. The article discusses the problems of low-quality water in the South-Western residential area of Novosibirsk and the measures taken to improve the environmental situation. It has been found that a shallow depth in the beach area, within 2–6 m, contributes to the eutrophication of the water body and reduces its recreational value in this area. Based on depth measurements and field observations, a map of the beach area of the reservoir was created, and the cleaning of the reservoir bottom area by a mini dredger was recommended.

Keywords: flooded quarry, protection of water objects, eutrophication

Введение

Обводненные карьеры представляют собой уникальные экосистемы, обладающие высоким рекреационным потенциалом для городских территорий [1–4].

Несмотря на очевидную значимость обводненных карьеров для земель населенных пунктов, в российской практике при использовании водных объектов искусственного происхождения нередко возникают спорные ситуации, связанные с получением права пользования [5, 6]. Так, в судебном производстве отмечен случай снятия земельного участка, занятого искусственным водным объектом с Единого государственного реестра недвижимости и признании отсутствующим на него права собственности [7].

Также наибольшее количество происшествий на воде зарегистрировано на обводненных карьерах, что связано с их специфическими характеристиками.

В результате с целью предотвращения вреда жизни или здоровью граждан в некоторых субъектах РФ установлен запрет на посещение обводненных карьеров, что, например, исполнено на территории Ленинградской области в 2023 году [8].

Вопросам природоохранной деятельности на обводненных карьерах посвящены работы отечественных и зарубежных авторов [9, 10]. Принципы формирования рекреационных зон после рекультивации карьеров на территории Белгородской области сформулированы в работе Р. Е. Галдина, Н. В. Алейниковой, Т. С. Ярмош [11]. Эколого-геохимические обследования пяти обводненных карьеров г. Новосибирска, представляющих интерес в качестве возможных рекреационных зон, представлены в работе А. Е. Мальцева, Г. А. Леоновой, Т. М. Булычевой [12]. Положительные функции искусственных водоемов по формированию экологической обстановки отмечены в статье Л. К. Трубиной, Ю. Д. Шумской [13]. Жизненный цикл карьеров и образование на их месте водных объектов описан в трудах М. В. Шайхулиной [14, 15].

Учитывая высокую техногенную нагрузку на урбанизированных территориях, проблемные вопросы государственного учета обводненных карьеров, данная тема является актуальной.

Методы и материалы

Объектом исследования является пляжная зона обводненного карьера, расположенного на территории Юго-Западного жилмассива г. Новосибирска. К природоохранным мероприятиям, проводимых на территории водоема, следует отнести высадку 10 тысяч сосен возле жилого комплекса «Лето» 23 сентября 2017 г., ежегодные экологические акции по сбору мусора с прибрежной полосы.

К проблемным вопросам использования данного водоема для рекреационных целей является неудовлетворительное качество воды, вызванное неочищенными сточными водами, попадание которых обусловлено наличием ливневого коллектора в северной части карьера. Тем не менее, часть обводненного карьера интенсивно используется в летний период жителями Ленинского района для купания, хотя он не входит в реестр пляжей, предназначенных для этих целей. По этой же причине водолазные работы по очистке дна водоема от скапливающегося мусора не проводится. Небольшая глубина в пляжной зоне в пределах 2–6 м способствует

в том числе эвтрофикации водоема и снижению на этом участке его рекреационной ценности.

Карта-схема промеров глубин и обозначение участков пляжной зоны, подверженной эвтрофикации, представлена на рисунке 1.



Рис. 1 Карта-схема пляжной зоны обводненного карьера

В целях снижения степени эвтрофикации, предлагается использование мини земснаряда марки Юнга-5. Основной областью применения данного земснаряда являются не громоздкие работы по углублению водоема, а удаление водорослей, тины, камыша и откачка ила. Основные технические характеристики земснаряда представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики мини земснаряда Юнга-5

№ п/п	Рабочий инструмент	Поворотная стрела: – мульчер (шнек) с приводом от гидромотора D 500 мм, L 750 мм, 150 об/мин.; – блок для плотного грунта с насосом; – грейферный захват
1	Максимальная рабочая глубина, м	4
2	Производительность по грунту м ³ /ч	20
3	Размеры (длина/ширина), мм	6 700/2 400
4	Вес полной комплектации, кг	1 400

На основе опыта проведения работ по очистке прудов и противопожарных водоемов от донных отложений, данные работы следует проводить не реже 1 раза в 5 лет.

Заключение

Представленные исследования касаются лишь небольшого участка водного объекта, наиболее интенсивно используемого в рекреационных целях. Учитывая огромную площадь данного обводненного карьера (34,3 га), его значительную глубину (до 18 м) сбросы ливневой канализации не влияют на загрязнение пляжной зоны. Для предотвращения эвтрофикации, возникающей вследствие прогревания поверхности воды, стоит рекомендовать проведение работ по очистке дна данной части обводненного карьера мини земснарядом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геоэкологическая рекультивация и санация территорий карьеров по добыче строительных материалов / Г. А. Бортникова, Л. А. Межова, А. М. Луговской, М. Ю. Евдокимов, А. Ю. Ткачев, П. В. Рихардт // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 6. – С. 40–45.
2. Горюхин, М. В. Повторное использование выработанного карьерного пространства отработанных обводненных карьеров полезных ископаемых / М. В. Горюхин // Территориальные исследования: цели, результаты и перспективы : Тезисы IX Всероссийской научной конференции молодых ученых, Биробиджан, 03–04 октября 2017 года / Под редакцией Е. Я. Фрисмана. – Биробиджан: Институт комплексного анализа региональных проблем Дальневосточного отделения РАН, 2017. – С. 11–14.
3. Сидорова, М. Ю. Геоэкологическая оценка загрязнения территории Новосибирска и его малых рек : специальность 25.00.36 «Геоэкология (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук / Сидорова Мария Юрьевна. – Барнаул, 2012. – 160 с.
4. Трубина, Л. К. Методологические аспекты экологической оценки состояния урбанизированных территорий / Л. К. Трубина // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 2, № 3. – С. 203–206.
5. Стасюк, Д. А. К вопросу о значимости определения понятий «пруд» и «обводненный карьер» в Водном кодексе Российской Федерации / Д. А. Стасюк // Государство и право: теория и практика : Материалы II Международной научной конференции, Чита, 20–23 марта 2013 года. – Чита: Издательство Молодой ученый, 2013. – С. 48–51.
6. Рыженков, А. Я. О принципе равного доступа физических и юридических лиц к приобретению в собственность водных объектов / А. Я. Рыженков // Вестник Томского государственного университета. Право. – 2016. – № 4(22). – С. 144–154. – DOI 10.17223/22253513/22/16.
7. Решение Арбитражного суда Краснодарского края по делу № А32-3709/2021 от 09.07.2021 г. [Электронный ресурс]. – URL: <https://sudact.ru/arbitral/doc/5A2aG1mY4D6g/> (дата обращения: 26.03.2026).
8. Постановление Правительства Ленинградской области от 05.06.2023 № 351 «О запрете посещения карьеров на территории Ленинградской области».
9. Букалова, Н. П. К вопросу использования обводненных карьеров в полевом водоснабжении / Н. П. Букалова, С. В. Ковалев, П. Ю. Игнатьев // Дневник науки. – 2020. – № 11(47). – С. 23.
10. Данильченко, А. О. Базовые принципы ревитализации обводненных меловых карьеров для использования в туристско-рекреационных целях / А. О. Данильченко, А. И. Романчук, С. А. Хомич // Беларусь в современном мире : материалы XVII Международной научной конференции, посвященной 97-летию образования Белорусского государственного университета,

Минск, 26 октября 2018 года / Председатель редсовета В.Г. Шадурский. – Минск: Белорусский государственный университет, 2018. – С. 245–247.

11. Галдин, Р. Е. Формирование рекреационных зон путем использования нарушенных городских земель / Р. Е. Галдин, Н. В. Алейникова, Т. С. Ярмош // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 12. – С. 73–83. – DOI 10.34031/2071-7318-2021-6-12-73-83.

12. Эколого-геохимическая оценка степени антропогенного загрязнения экосистем обводненных карьеров г. Новосибирска / А. Е. Мальцев, Г. А. Леонова, А. А. Богуш, Т. М. Булычева // Экология промышленного производства. – 2014. – № 2(86). – С. 44–53.

13. Шумская, Ю. Д. Некоторые аспекты методики кадастровых работ в отношении земельных участков, занятых обводненными карьерами / Ю. Д. Шумская, Л. К. Трубина // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 6, № 2. – С. 169–174. – DOI 10.33764/2618-981X-2019-6-2-169-174.

14. Шайхулина, М. В. Жизненные циклы карьеров и их правовой статус / М. В. Шайхулина // Молодой ученый. – 2019. – № 3(241). – С. 62–64.

15. Шайхулина, М. В. Классификация обводненных карьеров / М. В. Шайхулина // Молодой ученый. – 2019. – № 4(242). – С. 346–348.

© И. М. Ламков, Д. В. Панов, Л. А. Головина, 2026

С. П. Казьмин^{1✉}, О. В. Климов¹

Климатический феномен малого ледникового периода и его экологические последствия

¹Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: c_kazmin@mail.ru

Аннотация. Важным вопросом новейших изменений климата следует считать малый ледниковый период. Наиболее ранние фактические данные об этом похолодании известны в Западной Европе. Оно продолжалось от 1450 до 1850 гг., т.е. около 400 лет. Переход к похолоданию на планете не был одновременным и двигался с запада на восток. Для Западной Сибири принят хронологический интервал времени - 1550-1850 годы. Такое сокращение тепла носило глобальный характер. Оно отражало кратковременное уменьшение притока тепла к земной поверхности из космоса. Причина выявленного похолодания климата всей Евразии является сложным вопросом. Исследование всего малого ледникового периода, особенно времени его окончания, позволяют обосновать реальные причины антропогенного влияния на климат. Для экологической проблемы данные похолодания крайне важны.

Ключевые слова: ландшафт, долина, гидросеть, климат, озеро, речной сток

S. P. Kazmin^{1✉}, O. V. Klimov¹

The little ice age climate phenomenon and its environmental consequences

¹Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: c_kazmin@mail.ru

Abstract. The Little Ice Age should be considered an important issue of the latest climate changes. The earliest actual data on this cooling is known in Western Europe. It lasted from 1450 to 1850, i.e. about 400 years. The transition to a cooling on the planet was not simultaneous and moved from west to east. The chronological time interval for Western Siberia is 1550-1850 years. This reduction in heat was global in nature. It reflected a short-term decrease in the influx of heat to the Earth's surface from space. The cause of the identified cooling of the Eurasian climate is a complex issue. Research on the entire Little Ice Age, especially the time of its end, allows us to establish the real causes of anthropogenic influence on the climate. These cooling data are crucial for addressing environmental challenges.

Keywords: landscape, valley, hydrological network, climate, lake, river flow

Введение

В настоящее время природопользование, ресурсопотребление, гармонизация взаимодействия общества и природы требует регулирования и прогнозирования на фундаментальной основе. На базе детального обширного фактического материала Западной Сибири и иных регионов умеренного пояса Северного полушария впервые охарактеризован малый ледниковый период, как следствие

энергетического фактора астрономического притока к земной поверхности, прослежен характер условий осадконакопления, речного стока и формирования основных черт современного рельефа. Проведенные исследования показали динамику тепла и холода, сухости и влажности за период времени около 1250 лет (рис.1) [1].

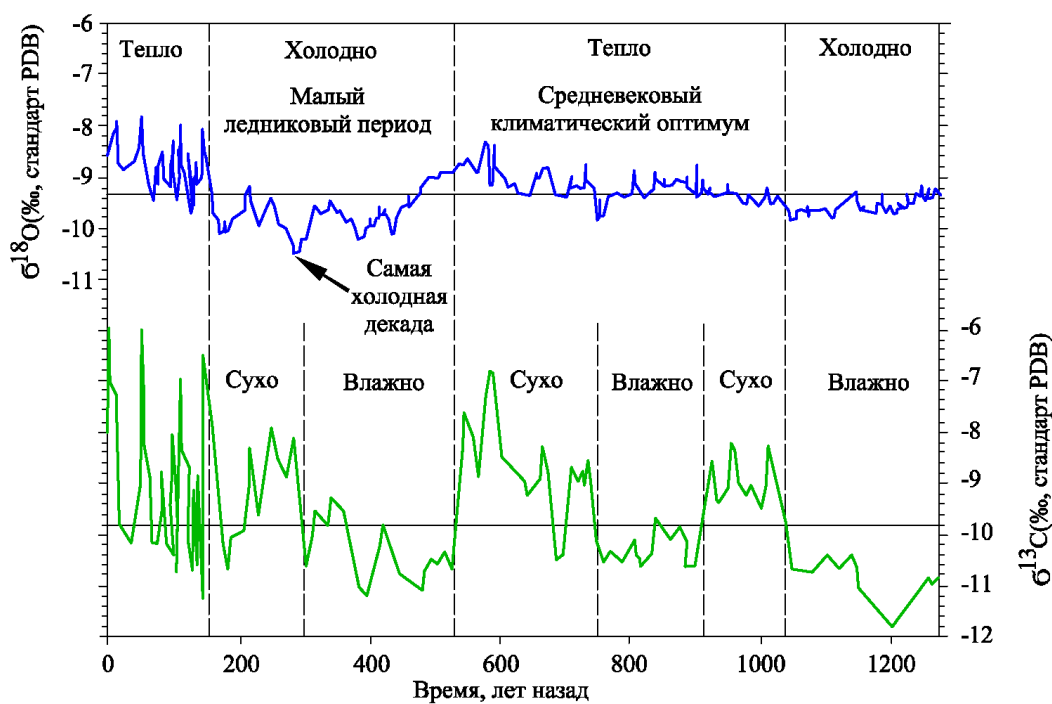


Рис. 1. Динамика тепла и влаги по датированию изотопов кислорода и углерода 1270-летнего сталагмита из Пещеры Будды, Китай [1]

Методы и материалы

На территории Западной Сибири и всей Северо-Восточной Азии геологические образования малого ледникового периода выявлены как в равнинной части, так и в горном Алтае. Охарактеризованы подобные отложения в пределах бассейна Амура и всего Дальневосточного региона [2]. Известная Новокаспийская трансгрессия Каспия также хронологически совпадает с малым ледниковым периодом. Следовательно, теперь можно уже считать твердо установленным, что названное похолодание охватывало всю Евразию, т.е. территории всего Старого света. Оно носило глобальный характер, и было позже конца субатлантического периода голоцена, принятого в палеоклиматических схемах.

Существенное внимание уделялось изучению изменения климата в пределах южной окраины Западной Сибири, обладающей лесостепными, а отчасти и степными ландшафтами. Здесь, на всей семиаридной окраине Западной Сибири сочетания гидротермического баланса и стока своеобразны. Тут есть природные образования как аридного пояса, эолового и иного субэразильного генезиса, так и холодного гидротермического пояса и стока. Бессточные междуречные пространства в

пределах Обь-Иртышского, Иртыш-Ишимского и Ишим-Тобольского районов в целом представляют собой сложное сочетание возвышений, обладающих гидротермическим балансом недостаточного увлажнения и понижений избыточного увлажнения.

Прежде всего, в пределах затронутого региона исследований следует подчеркнуть основную особенность современных ландшафтов, это континентальный характер климата региона в целом. Следствием этого являются весьма существенные изменения погодных условий различных сезонов года. Это относится к динамике притока энергии и влажности к поверхности Земли, а также резкая изменчивость динамики притока влаги и испарения в разные сезоны.

Наблюдения и учёт литературных данных ясно показали, что климат недавнего прошлого в южной семиаридной полосе Западной Сибири отличался от современного. Гидросеть существенно изменилась. Особенно преобразовалась озёрная система. Многие разнообразные факты свидетельствуют о том, что гидросеть этой полосы испытывала существенные колебания влажности. Это особенно заметно по характеру гидрологических процессов, состоянию озёр и стоку местных рек. Хорошо известны, например, научные труды профессора А.В. Шнитникова о колебании уровня озёр южной части Западной Сибири. Но они касаются главным образом правобережья Иртыша, т.е. ограничены по площади наблюдений.

Большинство крупных водоёмов южной окраины Западной Сибири имели более высокий уровень, по сравнению с современным. Таковы оз.Убинское и система озёр Чаны в Барабе, оз.Чаглы на СВ Кокчетавской возвышенности, система озёр Салтаим и оз.Чёрное на Ишим-Тобольском междуречье. Они не только имели высокие уровни, но были также сточными. Избыток вод озёра сбрасывали по мелким местным речкам: оз.Убинское по рч.Угурманка, оз.Чаны – из Юдинского плёсса на запад в оз.Курумбельское, оз.Чаглы – по р.Чаглинка в сторону Иртыша, оз.Чёрное – на север по рч. Камышловка в верховьях Вагая и на запад по долине Емуртлы [3].

Конец XIX-го в., XX в. и начало текущего столетия являлись временем единого снижения уровней озёр и сокращения стока местных рек. Уровни водоёмов понизились, а сток местных водотоков сократился (рис. 2) [4]. Большинство названных крупных озёр стало бессточными. Так, например, оз.Убинское не только стало бессточным, но и почти высохло. Система оз.Чаны значительно понизила уровень и также сократила площадь водной поверхности. Именно поэтому было отчленено обширное Юдинское плёссо дамбами и усохло, обратившись в солончак. Усохли и многие мелкие озёра ныне семиаридной зоны Западной Сибири. Это общее усыхание охватывало в основном время XX-го века.



Рис.2. Эволюция гидрографической сети степей Срединного региона в XVIII-XIX вв.

*Прерывистые линии – мигрирующие реки;
темные контуры – площади усохших рек и озёр*

Крупное оз.Убинское во второй половине XX-го века начало усыхать. Этот процесс продолжался и в последние годы. Особенности береговой линии самого озера и характер рельефа расположения подтверждают факт его длительного усыхания. Сохранились остатки древних береговых линий, свидетельствующих о значительно более высоком уровне этого озера в недалеком прошлом. Есть и другая особенность строения гидросети района оз.Убинского, свидетельствующая о том же. Здесь в северо-западной части расположены многочисленные ныне бессточные озера, которые имеют столь низкие берега, что при древнем более высоком уровне основного озера они, несомненно, отчасти входили в его общую акваторию. Западнее озера расположена неширокая долина небольшой речки Угурманки. По этой долине сбрасывался избыток вод, когда уровень оз.Убинское был значительно выше современного. Усыхание этого ранее обширного водоёма отражает не только уменьшение влагообеспеченности района самого озера, но и западной части Васюганья, которая являлась основным регионом поступления влаги в оз.Убинское с востока.

Сокращение обводнения гидросети достаточно детально изучено на обширной территории оз. Чаны и его озёрно-речного бассейна. Многолетние исследования сотрудников Института озероведения АН СССР позволили выявить сложную историю колебаний уровня самого озера и других элементов гидросети Барабы. Термин "пульсирующее озеро Чаны" наиболее точно отражает эволюцию самого крупного в Западной Сибири водоёма [4]. В монографии авторы ограничиваются характеристикой наиболее молодого, последнего увлажнения озера Чаны и всего его обширного озёрно-речного бассейна.

Нижний возрастной предел последнего высокого уровня оз.Чаны это время после окончания малого ледникового периода. Известно вполне определенно, что на протяжении XVIII-го и XIX-го веков озеро имело уровень близкий к отметке 109 м, при котором этот обширный водный бассейн был сточным (рис. 3)

[5]. Западнее Юдинского плёса избыток вод водоёма сбрасывался на запад в обширное понижение, которое теперь именуется Курумбельской степью. Оно тогда было ещё одним элементом озёрной системы Чаны и возможно само сбрасывало избыток вод в долину Иртыша. Проведённые исследования подтверждают реальность таких заключений.

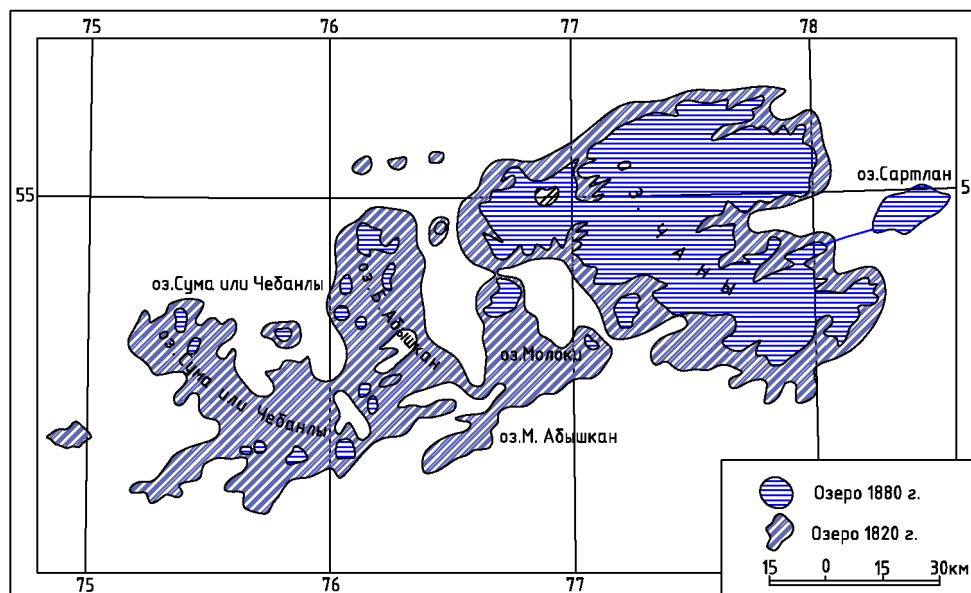


Рис.3. Усыхание системы оз. Чаны в XIX в.

В начале XX-го века с оз.Курумбельского началось усыхание системы оз.Чаны, которое продолжается до настоящего времени. Этот процесс нанёс сильный удар, прежде всего по рыболовству. Выполнены некоторые хозяйственные мероприятия с целью уменьшить испарение с поверхности озера. Была построена земляная дамба, отчленявшая Западный Юдинский плёс от остальной акватории. Этот плёс довольно быстро высох и обратился в солончак.

Результаты

Нет никаких сомнений, что усыхание озёр Убинское и Чаны отражает динамику поверхностного стока Васюганского плато и всей Барабы. Оно отразило определенный климатический процесс всего юго-востока Западной Сибири после малого ледникового периода.

Следы недавнего сокращения обводнённости ясно прослеживаются и севернее системы оз.Чаны в долине р.Оми, которая имеет озеровидные расширения. Теперь плоское дно таких расширений не заливаётся половодьями и рассматривается как первая речная терраса. Но у внешнего края этой поверхности протягиваются полосы береговых озёрных образований, налегающих на гумусированную почву. Они представлены россыпями раковин пресноводных моллюсков (главным образом гастропод), скоплениями супесей и растительных остатков. Эти, несомненно, озёрные береговые осадки ясно свидетельствуют об озёрном

режиме недавнего прошлого. Тогда поверхность ныне первой речной террасы с гидрологических позиций представляла собой пойму или даже дно мелководных проточных внутридолинных озёр. Половодья р. Оми были более высокими, т.к. климат был влажнее, чем теперь. Малая мощность наслоения озёрных береговых образований и повсеместное налегание их непосредственно на хорошо развитую гумусированную почву, являющейся следствием сухого климата ранее малого ледникового периода, ясно свидетельствуют о кратковременности озёрного режима.

Различные образования недавнего увлажнения климата распространены на обширных пространствах Ишим-Иртышского и Ишим-Тобольского междуречий, известных в литературе как Ишимская степь. Эта слабонаклонная на север равнина, простирающаяся севернее Кокчетавской возвышенности, обладает своеобразным мезо- и микрорельефом. Преобладает "колочный" западинный рельеф, который длительное время формировался, в основном, как бессточный. Такая бессточность обусловлена наличием неглубоких понижений, со склонов и дна которых влага в тёплые сезоны полностью испаряется обратно в атмосферу. Некоторые древние долины, пересекающие эти обширные междуречья, в основном, образовались давно в условиях климата, значительно более влажного, чем теперь.

Приведенный выше обзор признаков и образований недавнего увлажнения климата южной окраины Западной Сибири в целом свидетельствует о том, что оно было кратковременным. Ныне семиаридная полоса была самой южной частью зоны избыточного увлажнения Западной Сибири. Это смещение южной границы пояса избыточного увлажнения было единым и охватывало небольшой промежуток времени малого ледникового периода. В целом увлажнение, повышение уровней озёр и обильности речного стока не сопровождалось сколько-нибудь значительным изменением рельефа и геологического строения. Сформировались эфемерные береговые озёрные валы, переместились вверх по долинам истоки долин, наметились образования последовавшего за увлажнением усыхания.

К сожалению образования обрисованного увлажнения климата пока не привлекли должного внимания большого числа исследователей. Однако, важнейшее значение этого природного феномена, несомненно. Во многих местах водные образования подстилаются гумусированной почвой и иными образованиями климата, близкого к современному. Фактические данные ясно свидетельствуют, что увеличение влажности климата охватывало в Западной Сибири, в основном, вторую половину XX-го века.

Дно трога между современным краем ледника и новейшей частью гляциальной гряды, не покрытой лишайниками, является ярким аналогом приледниковой высокогорной тундры, известной в Альпах, как луга стадии Фернау исторического продвижения ледников. Если это так, то приледниковая тундра трога Тары Южночуйского хребта есть альпийская "историческая" стадия Альп. Следовательно, эта стадия имела глобальный характер, т.к. она проявилась в пределах всего Старого света Земли. Она образовалась именно во время малого ледникового периода.

Заключение

Итак, важным вопросом новейших изменений климата следует считать малый ледниковый период. Это пример глобального события изменения астрономического притока к земной поверхности. Оно ясно показывает, что реакция природной среды времени максимума похолодания и последующего потепления есть следствие уменьшения и последующего повышения солнечного притока к Земле. Малый ледниковый период отражал некоторое кратковременное уменьшение притока тепла к Земле из космоса. В целом это был "плювиал" всей средней полосы Евразии. В Сибири похолодание сопровождалось подъёмом уровней озёр и существенным оживлением речного стока. Позже похолодания, гидротермический баланс земной поверхности вновь изменился. Произошло некоторое потепление климата, вызвавшее сокращение влагообеспеченности, а также уменьшение и в значительной мере прекращение речного стока. Вновь установились те же аридные природные условия, которые были до похолодания. И во время увлажнения климата, и в последующее время его относительного иссушения ведущим фактором являлась теплообеспеченность, а влага была следствием динамики тепла.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБУ «СибНИГМИ» по теме: 2.13. Развитие методов и технологий специализированного обеспечения гидрометеорологической, климатической информацией потребителей Сибирского региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панин А.В. Методы палеогеографических исследований: четвертичная геохронология. Учебное пособие. – М.: географический факультет МГУ, 2014. -116 с.
2. Базарова В.Б. Малый ледниковый период в бассейне Амура // Материалы Междун. научн. конф. «Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-Восточной и Центральной Азии» (Иркутск, 17-21 сентября 2012 г.). - Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. - Т. 2. - С.6-8.
3. Волков И.А., Волкова В.С., Задкова И.И. Покровные лессовидные отложения и палеогеография юго-запада Западной Сибири в плиоцен-четвертичное время. - Новосибирск: Наука, 1969. - 332 с.
4. Пульсирующее озеро Чаны // Отв. ред.: Н.П. Смирнова, А.В. Шнитников.- Л.: Наука.- 1982.- 304 с.
5. Крубер А.А. Общее землеведение (физическая география) - М.-Л.: Государственное учебно-педагогическое издательство, 1938. - 472 с.

© С. П. Казьмин, О. В. Климов, 2026

Д. К. Нгуен^{1✉}, О. Н. Николаева²

О выборе территориальных единиц картографирования для моделирования экологической обстановки города

¹Московский государственный университет геодезии и картографии,
г. Москва, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
email: nguyendinhquan7788266@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проблема выбора территориальных единиц картографирования при моделировании экологической обстановки крупного города. На примере Ханоя показано, что использование единственного типа пространственных единиц не позволяет одновременно учитывать природные закономерности миграции загрязняющих веществ, особенности пространственно непрерывных экологических факторов и требования государственного управления. Предлагается многоуровневая система операционных территориальных единиц (ОТЕ), включающая регулярную сетку, речные бассейны и административноправовые единицы. Особое внимание уделяется обоснованию выбора сеточной ОТЕ первого уровня для картографирования пространственно непрерывных факторов городской среды. Выбор формы и размера сетки предлагается выполнять на основе шести критериев: свойств картографируемого явления, качества исходных данных, особенностей моделей и алгоритмов, масштаба картографирования, городской морфологии и чувствительности результатов к проблеме модифицируемой площадной единицы. В качестве базовой сеточной ОТЕ городского уровня предлагается регулярная шестиугольная сетка площадью около 25 га.

Ключевые слова: экологическое картографирование, ОТЕ, Ханой, шестиугольная сетка, речной бассейн, административные границы, МАУР

D. Q. Nguyen^{1✉}, O. N. Nikolaeva²

On the selection of territorial mapping units for modelling the ecological situation of a city

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: nguyendinhquan7788266@gmail.com

Abstract. The article examines the problem of selecting territorial mapping units for modelling the ecological situation of a large city. Using Hanoi as a case study, it is shown that the use of a single type of spatial unit does not make it possible to simultaneously account for the natural patterns of pollutant migration, the characteristics of spatially continuous environmental factors, and the requirements of public administration. A multilevel system of operational territorial units (OTUs) is proposed, including a regular grid, river basins, and administrative legal units. Particular attention is paid to justifying the choice of the first level grid based OTU for mapping spatially continuous factors of the urban environment. The selection of the grid shape and size is proposed to be based on six criteria: the properties of the mapped phenomenon, the quality of the input data, the characteristics of the models and algorithms used, the mapping scale, urban morphology, and the sensitivity of the results

to the Modifiable Areal Unit Problem (MAUP). A regular hexagonal grid with an area of approximately 25 hectares is proposed as the basic gridbased OTU at the urban level.

Keywords: environmental mapping, OTU, Web GIS, Hanoi, hexagonal grid, river basin, administrative boundaries, MAUP

Введение

В современных географических и экологических исследованиях выбор территориальной единицы картографирования является одним из ключевых методических вопросов. От того, каким образом территория делится на пространственные единицы, зависит не только внешний вид карты, но и достоверность пространственного анализа, корректность интерполяции, возможность сопоставления разнородных данных и практическая применимость результатов для экологического управления.

Особенно остро данная проблема проявляется при моделировании экологической обстановки крупного города. Городская среда характеризуется высокой плотностью населения, сложной структурой источников загрязнения, неоднородной застройкой, интенсивной транспортной нагрузкой, фрагментарностью зеленых насаждений и существенной трансформацией природных ландшафтов. В этих условиях невозможно ограничиться только административными границами, поскольку атмосферные выбросы, шум, тепловое поле и водный сток не подчиняются административному делению. Вместе с тем полностью отказаться от административных единиц также нельзя, поскольку именно они являются основой статистического учета, природоохранного контроля и принятия управленческих решений.

Методы и материалы

В теории геоэкологического картографирования операционная территориальная единица (ОТЕ) рассматривается как базовая пространственная единица, используемая для сбора, анализа, интерполяции, агрегирования и визуализации экологических данных. Некорректный выбор такой единицы может привести к искажению пространственной картины загрязнения, завышению или занижению экологических оценок и ошибочным управленческим выводам [1].

Одной из наиболее известных проблем, связанных с выбором территориальных единиц, является проблема модифицируемой площадной единицы (Modifiable Areal Unit Problem/MAUP). Она проявляется в том, что результаты анализа могут существенно изменяться в зависимости от формы, размера и способа группировки пространственных единиц. Например, один и тот же набор точечных наблюдений за качеством воздуха может дать различные пространственные оценки при агрегировании по административным районам, регулярной сетке или природным бассейнам.

В существующих исследованиях единицы картографирования целесообразно разделять на две группы. Первая группа – минимальные единицы оценки, используемые для непосредственного расчета или моделирования экологических показателей. Вторая группа – агрегированные аналитические единицы, необходимые для обобщения результатов, интерпретации и практического применения в системе

управления [2]. В настоящее время выделяют три основных подхода к формированию таких пространственных единиц:

Сеточный подход: наиболее распространенный в современных ГИС-технологиях, основан на использовании регулярных квадратных матриц, равномерно покрывающих исследуемую территорию. Преимущество данного подхода заключается в упрощении математических вычислений, что позволяет оперативно интегрировать множество различных растровых слоев данных. Однако с позиции ландшафтно-экологического анализа такие ячейки лишены содержательного смысла, так как они фрагментируют биотопы, не отражают реальных природных границ и не позволяют учесть целостность экосистем или направленность потоков вещества [3].

Ландшафтный подход: базируется на таксономических единицах физической географии (ландшафт, урочище, фация). Данный метод эффективен при оценке устойчивости экосистем к внешнему воздействию, поскольку каждая ландшафтная единица обладает специфической экологической емкостью [1]. Тем не менее, в условиях высокоурбанизированной среды, такой как Ханой, естественная поверхность подверглась глубокой трансформации вследствие сплошной застройки и «запечатывания» почв. Это делает выделение границ ландшафтов субъективным процессом, в рамках которого сложно достичь научной обоснованности.

Бассейновый подход: рассматривается как наиболее оптимальная и системная методологическая основа в современной геоэкологии, особенно для территорий с развитой гидрографической сетью. Речной бассейн представляет собой не просто топографическую границу, а целостную природную геосистему, объединенную направленным потоком вещества и энергии от водоразделов к эрозионным понижениям [4]. Любое антропогенное воздействие на территорию бассейна от бытовых отходов и сельскохозяйственных химикатов до городских сточных вод аккумулируется и наиболее выражено проявляется в качественных показателях вод в замыкающем створе.

Результаты

Однако экологические процессы имеют иную пространственную природу. Загрязнение атмосферного воздуха распространяется в зависимости от структуры источников выбросов, метеорологических условий и городской морфологии. Загрязнение водной среды подчиняется логике водосборных бассейнов, рельефа и направленного стока. Тепловое загрязнение и шум формируют поля, которые не совпадают с административными рубежами. Поэтому возникает методическое противоречие: данные управления организованы по административным единицам, тогда как природные процессы развиваются по физикогеографическим закономерностям. Для преодоления данного противоречия предлагается использовать гибридную многоуровневую систему территориальных единиц картографирования, включающую три взаимосвязанных уровня ОТЕ.

Первый уровень – регулярная сеточная ОТЕ. Он предназначен для картографирования пространственно непрерывных биофизических факторов городской

среды: качества атмосферного воздуха, шума, теплового режима и других параметров, изменяющихся без строгой привязки к административным границам. На этом уровне территория города делится на регулярные ячейки, которые выступают минимальными единицами оценки. Выбор сетки не может быть произвольным и должен учитывать не только техническую удобность, но и экологическую природу картографируемых явлений. В настоящем исследовании предлагается использовать шесть критериев выбора формы и размера сеточной ОТЕ.

1. Первый критерий – физико-химические и пространственные свойства картографируемого явления. Разные экологические факторы обладают неодинаковой пространственной изменчивостью. Транспортнозависимые загрязнители и шум характеризуются резкими локальными градиентами, тогда как $PM_{2.5}$ и PM_{10} формируют более сглаженное, но всё же неоднородное поле концентраций. Это означает, что один и тот же размер сетки не может быть одинаково оптимален для всех видов загрязнения и всех масштабов анализа.

2. Второй критерий – пространственное разрешение и качество исходных данных. Размер ячейки должен соответствовать фактической информативности спутниковых, метеорологических, картографических и наземных данных. Чрезмерно мелкая сетка может создавать эффект ложной точности, когда карта выглядит более детальной, чем это допускается исходной информационной базой.

3. Третий критерий – особенности применяемых моделей и алгоритмов. Сеточная ОТЕ должна быть пригодна для пространственной интерполяции, даунскейлинга, расчета предикторов, растровой алгебры и сопоставления результатов моделирования. Она должна быть достаточно детальной для выявления внутригородских различий, но одновременно достаточно устойчивой для статистически надежного расчета показателей.

4. Четвертый критерий – масштаб и цель картографирования. Если задача состоит в микромасштабном моделировании отдельной улицы, транспортного узла или промышленного источника, требуется одна степень детализации. Если же цель заключается в экологическом веб-картографировании всей городской территории, необходима более обобщенная и устойчивая единица. В рамках настоящей работы акцент делается именно на городском уровне.

5. Пятый критерий – городская морфология и структура источников загрязнения. Ханой характеризуется сочетанием плотной жилой застройки, крупных магистралей, промышленных зон, ремесленных поселений, водоемов, парков и зеленых насаждений. Выбранная сетка должна позволять отразить контрасты между этими типами городского пространства.

6. Шестой критерий – чувствительность результатов к MAUP. Форма и размер ячейки должны минимизировать искажения, возникающие при искусственном делении непрерывного пространства на дискретные территориальные единицы. В этом отношении важны не только площадь ячейки, но и ее геометрия, структура соседства и устойчивость результатов при последующей агрегации.

Указанные критерии показывают, что не существует единого размера сетки, одинаково оптимального для всех видов загрязнения воздуха. Однако для экологической Веб-ГИС городского уровня необходимо определить стандартную сеточную

ОТЕ, позволяющую интегрировать и сопоставлять различные экологические показатели в единой пространственной системе. В качестве основной сеточной ОТЕ первого уровня предлагается регулярная шестиугольная сетка площадью около 25 га (рис. 1). Такой размер ячейки рассматривается как методический компромисс. С одной стороны, ячейка площадью около 25 га достаточно детальна для выявления внутригородских контрастов экологической обстановки, например различий между зонами интенсивной транспортной нагрузки, промышленной застройки, плотной жилой застройки. С другой стороны, такая ячейка достаточно обобщена, чтобы снизить влияние локальных пробелов наблюдений и не создавать чрезмерной детализации, не обеспеченной исходными данными.

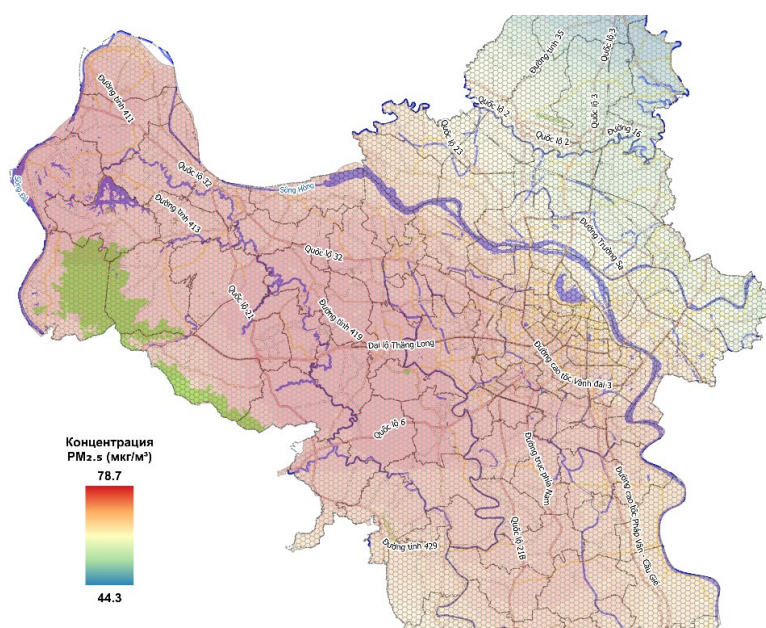


Рис. 1. Карта распределения среднесесячной концентрации $PM_{2.5}$ в апреле 2023 г. на шестиугольной сетке площадью 25 га

Выбор шестиугольной формы обусловлен рядом преимуществ по сравнению с квадратной сеткой. Шестиугольная ячейка имеет более равномерную структуру соседства: каждая ячейка имеет шесть соседей, расположенных более равноправно по отношению к центру. В квадратной сетке возникает неоднозначность между ортогональными и диагональными соседями, что может влиять на анализ пространственной связности, кластеров и направлений распространения процессов. Шестиугольная сетка также обладает меньшей направленной анизотропией и визуально лучше передает пространственные паттерны без избыточной ориентации по вертикальным и горизонтальным осям.

Второй уровень – природно-географические единицы, прежде всего речные бассейны и подбассейны. Этот уровень необходим для оценки состояния водной среды, ассимиляционного потенциала водных объектов, накопления загрязняющих веществ и анализа антропогенной нагрузки в пределах водосборов. Для водной среды административные границы или регулярные сетки менее репрезентативны, чем бас-

сейновые единицы, поскольку перенос загрязняющих веществ подчиняется рельефу и направлению стока [4]. Применительно к Ханюю в качестве ОТЕ второго уровня целесообразно использовать границы подбассейнов рек Толик, Ньюэ и Даи (рис. 2). Эти единицы позволяют рассчитывать суммарную антропогенную нагрузку, учитывать источники сброса, оценивать ассимиляционный потенциал поверхностных вод и анализировать качество донных отложений.

Бассейновый уровень не заменяет сеточный, а дополняет его. Если сетка используется для непрерывных факторов городской среды, то бассейны применяются там, где пространственная организация процесса определяется направленным водным стоком.

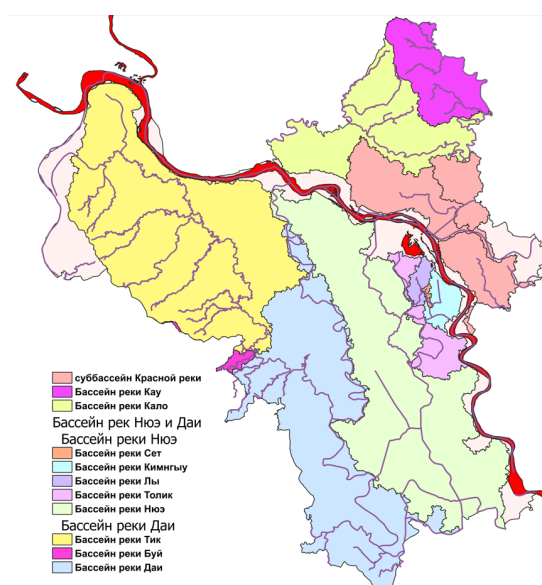


Рис. 2. Речные бассейны в Ханое

Третий уровень – агрегированные административные и правовые единицы. Несмотря на то, что пространственные сетки и речные бассейны оптимальны для проведения экологического анализа, они зачастую не учитываются в процессах государственного администрирования [5]. В связи с этим административные единицы (уровня общин, кварталов) должны быть в обязательном порядке определены в качестве агрегированных ОТЕ. Этот уровень обеспечивает связь результатов экологического анализа с системой государственного управления, статистического учета, экологического нормирования и принятия решений. Кроме административных границ, важную роль играют зоны экологического регулирования (рис. 3).

Согласно законодательству Вьетнама, экологическое зонирование включает зоны строгой охраны, зоны ограничения выбросов и иные зоны. Зоны строгой охраны охватывают наиболее чувствительные территории, включая центральные городские районы, источники поверхностных вод хозяйственнопитьевого назначения, природные заповедники, охраняемые зоны объектов историкокультурного наследия и ядра природного наследия. Зоны ограничения выбросов включают буферные зоны

территорий строгой охраны, важные водно-болотные угодья, охранные коридоры источников водоснабжения и другие чувствительные территории [9]. Цифровое представление таких границ в экологической Веб-ГИС позволяет автоматически сопоставлять измеренные или смоделированные показатели загрязнения с нормативными требованиями, а также формировать предупреждения для органов управления.

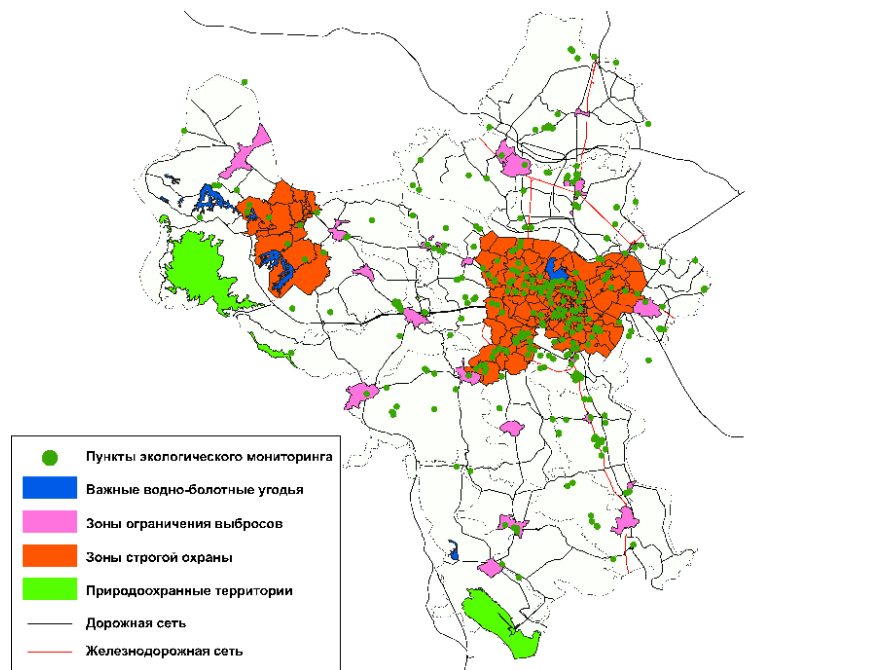


Рис. 3. Карта современного состояния экологического зонирования столицы Ханоя за 2023 год

Заключение

Выбор территориальной единицы картографирования является ключевым методическим условием достоверного моделирования экологической обстановки города. На примере Ханоя показано, что ни один тип пространственных единиц не способен самостоятельно решить все задачи экологического картографирования. Регулярная сетка удобна для моделирования пространственно непрерывных факторов, речные бассейны необходимы для анализа водной среды, а административные и правовые единицы обеспечивают практическую связь результатов с системой управления.

Предложенная многоуровневая система ОТЕ позволяет совместить научную корректность экологического анализа с требованиями государственного администрирования. Первый уровень – шестиугольная сетка площадью около 25 га – используется как стандартная сеточная ОТЕ городского уровня. Второй уровень – речные бассейны и подбассейны – обеспечивает учет природной логики водной среды. Третий уровень – административные границы и зоны экологического регулирования – обеспечивает связь с правовыми и управленческими механизмами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стурман В. И. Экологическое картографирование: учебное пособие. – М.: Аспект Пресс, 2003. – 258 с.
2. Shen J., Chen C., Wang Y. What are the appropriate mapping units for ecosystem service assessments? A systematic review // *Ecosystem Health and Sustainability*. – 2021. – Vol. 7. – № 1. – Article 1888655.
3. Cleland D. T., Avers P. E., McNab W. H., Jensen M. E., Bailey R. G., King T., Russell W. E. National Hierarchical Framework of Ecological Units // *Ecosystem Management Applications for Sustainable Forest and Wildlife Resources*. – New Haven: Yale University Press, 1997. – P. 181–200.
4. Yermolaev O. P., Usmanov B. M., Muharamova S. S. The Basin Approach and Mapping to the Anthropogenic Impact Assessment on the East of the Russian Plain // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2015. – Vol. 10. – № 20. – P. 41178–41184.
5. Stenis J., Romanov M., Hogland W. Analysis and Classification of Modern Methods of Ecological Normalization // *The Open Environmental Engineering Journal*. – 2011. – Vol. 4. – P. 181–189.
6. Birch C. P. D., Oom S. P., Beecham J. A. Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology // *Ecological Modelling*. – 2007. – Vol. 206. – № 3–4. – P. 347–359.
7. Mukharamova S., Ivanov M., Yermolaev O. Assessment of Anthropogenic Pressure on the Volga Federal District Territory Using River Basin Approach // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10. – № 4. – Article 139.
8. Национальное собрание СРВ. Закон об охране окружающей среды № 72/2020/QN14. – Ханой, 17 ноября 2020 г.
9. Правительство СРВ. Постановление № 08/2022/NĐ-CP «О детальном регулировании отдельных положений Закона об охране окружающей среды». – Ханой, 10 января 2022 г.
10. Правительство СРВ. Постановление № 307/2025/NĐ-CP «О классификации административных единиц». – Ханой, 27 ноября 2025 г.
11. Министерство природных ресурсов и экологии СРВ. Циркуляр № 01/2025/ТТ-BNNMT «Об утверждении трех национальных технических регламентов качества окружающей среды». – Ханой, 15 мая 2025 г.
12. Министерство природных ресурсов и экологии СРВ. Циркуляр № 06/2025/ТТ-BTNMT «Об утверждении Национального технического регламента по промышленным сточным водам». – Ханой, 28 февраля 2025 г.

© Д. К. Нгуен, О. Н. Николаева, 2026

В. А. Гладырева^{1✉}, Л. Ю. Анощенко²

Экологическая обстановка г. Новокузнецка

¹ООО «ЭКОСТАНДАРТ «СОФТ»

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vkurilskaya@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена комплексному анализу экологической обстановки в городе Новокузнецке – одном из наиболее проблемных с точки зрения загрязнения окружающей среды городов России. Актуальность темы обусловлена устойчивым негативным воздействием металлургического и углехимического комплексов на все компоненты окружающей среды: атмосферный воздух, водные ресурсы и почвенный покров. Новокузнецк по праву называют «городом-заводом» и хотя за последние 30 лет валовые выбросы загрязняющих веществ сократились, город по-прежнему занимает второе место в стране по загрязнению атмосферы. Источниками загрязнения выступают крупные промышленные предприятия (ЕВРАЗ ЗСМК, Новокузнецкий алюминиевый завод, Кузнецкая ТЭЦ, Кузнецкие ферросплавы), котельные, частный сектор с печным отоплением и автотранспорт. В работе показано, что вода в реке Томь и её притоках систематически не соответствует санитарно-гигиеническим нормативам из-за многолетних промышленных сбросов, а город занимает седьмое место в России по образованию отходов.

Ключевые слова: экологическая обстановка, негативное воздействие, загрязнение окружающей среды, оценка состояния

V.A. Gladysheva^{1✉}, L. Yu. Anopchenko²

The ecological situation of Novokuznetsk

¹LLC "EKOSTANDART "SOFT"

²Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vkurilskaya@mail.ru

Abstract. The work is devoted to a comprehensive analysis of the environmental situation in the city of Novokuznetsk, one of the most environmentally problematic cities in Russia. The relevance of the topic is due to the persistent negative impact of the metallurgical and coal chemical complexes on all components of the environment: atmospheric air, water resources, and soil cover. Novokuznetsk is rightfully called a "factory city," and although gross emissions of pollutants have decreased over the past 30 years, the city still ranks second in the country in terms of atmospheric pollution. The sources of pollution include large industrial enterprises (EVRAZ ZSMK, Novokuznetsk Aluminum Plant, Kuznetsk Thermal Power Plant, Kuznetsk Ferroalloys), boiler houses, private sector with stove heating, and vehicles. The study shows that the water in the Tom River and its tributaries does not meet sanitary and hygienic standards due to long-term industrial discharges, and the city ranks seventh in Russia.

Keywords: environmental conditions, negative impact, environmental pollution, assessment of the state

Введение

Цель настоящей работы – комплексная оценка экологической обстановки в городе Новокузнецке Кемеровской области – Кузбассе, одном из крупнейших промышленных центров России, на основе анализа данных мониторинга состояния атмосферного воздуха, водных объектов и системы обращения с отходами. Для достижения цели были поставлены следующие задачи исследования.

Определить приоритетные загрязняющие вещества и их концентрации в атмосферном воздухе и водных объектах города, а также установить источники их поступления.

Оценить эффективность мероприятий, реализуемых в рамках федерального проекта «Чистый воздух» национального проекта «Экологическое благополучие», и их влияние на качество окружающей среды.

Методы и материалы

В основе исследования лежат данные, полученные из официальных источников информации о состоянии окружающей среды в Кемеровской области – Кузбассе и городе Новокузнецке за период 2019–2024 гг. Использование этих данных обеспечивает высокую степень достоверности и объективности результатов.

Были проанализированы сводные данные территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Кемеровской области – Кузбассу (Кемеровостат) о выбросах загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников.

Проведён анализ ежемесячных и годовых докладов Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) в лице ФГБУ «Западно-Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (Западно-Сибирское УГМС), характеризующих уровень загрязнения атмосферного воздуха и водных объектов.

Использованы публичные отчёты в области устойчивого развития и материалы о реализации природоохранных программ крупнейших промышленных предприятий города (ЕВРАЗ ЗСМК, АО «Кузнецкие ферросплавы», АО «РУСАЛ Новокузнецк»).

Проведён обзор научных публикаций по теме исследования в рецензируемых журналах ВАК и статьи, которым присвоен DOI.

Основой методологии является системный анализ, позволяющий рассматривать городскую среду как сложную техно-природную систему.

Результаты

В 2024 году уровень загрязнения атмосферы в Новокузнецке оценивался как «высокий» и «очень высокий». Город оставался в числе лидеров России по выбросам загрязняющих веществ. Основные источники – промышленные предприятия (ЕВРАЗ ЗСМК (более 80% всех городских выбросов), «РУСАЛ Новокузнецк», «Кузнецкие ферросплавы», «Кузнецкая ТЭЦ»), а также котельные,

частный сектор и автотранспорт. Была составлена таблица 1 - 3В, которые максимально превышали ПДК.

Таблица 1. Максимальные значения загрязняющих веществ

Вещество	Концентрация (кратность ПДК)	Районы с максимальными значениями
Бенз(а)пирен	6,3 ПДК (среднегодовая)	Кузнецкий р-н
Формальдегид	3,95 ПДК (среднегодовая)	Центральный, Заводской
Взвешенные частицы (PM10)	2,6 ПДК	Кузнецкий район
Озон	1,7 ПДК	Кузнецкий район
Фтористый водород	1,4 ПДК	Орджоникидзевский, Кузнецкий районы
Фенол	2,0 ПДК	Заводской район
Сероводород	до 1,1 ПДК	Куйбышевский район
Аммиак	до 1,2 ПДК	—

В целом по городу уровень загрязнения воздуха в 2024 году характеризовался как высокий.

В рамках федерального проекта «Чистый воздух» по итогам 2024 года удалось снизить совокупный объем выбросов опасных загрязняющих веществ на 33,8%.

На основе сводных данных и годовых докладов была составлена карта загрязняющих веществ, их концентрации, а также места отбора проб в реке Томь.

Наглядное загрязнение реки и ее состояние за 2024 год (рис. 1).

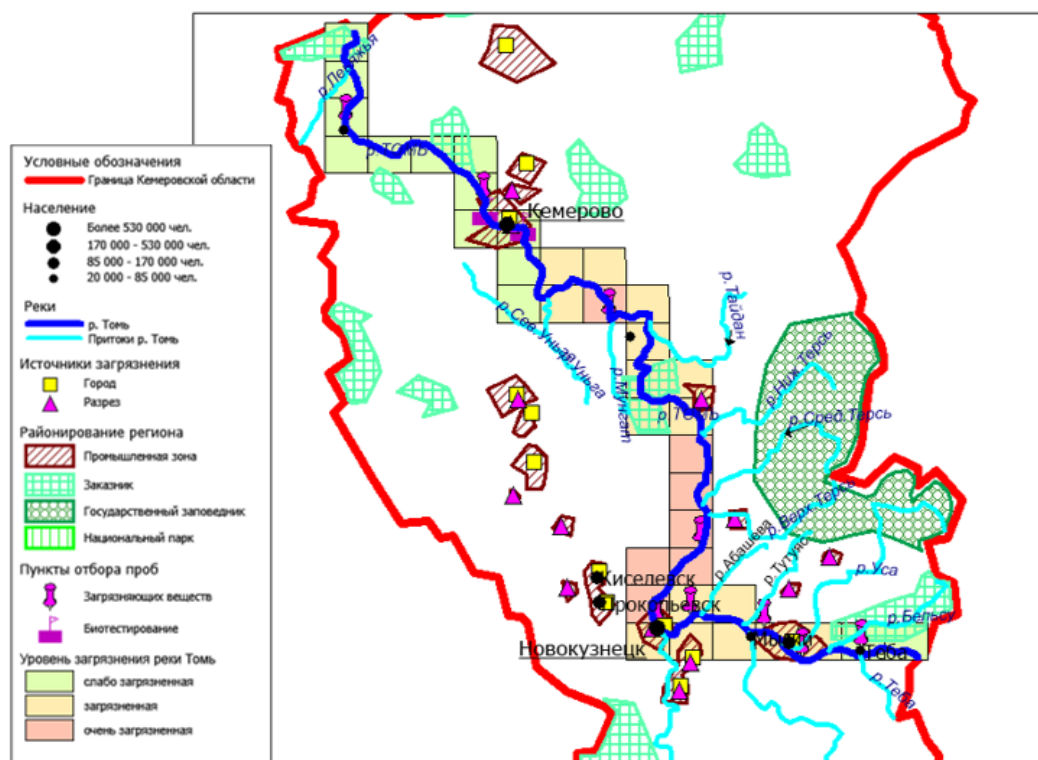


Рис. 1. Кемеровская область, карта поверхностных вод (реки) и уровень загрязнение главной артерии Кемеровской области за 2024 год

В 2024 году в Новокузнецке было зарегистрировано 16 предприятий, которые сбрасывали сточные воды в поверхностные водоёмы. Среди них:

АО «ЕВРАЗ ЗСМК» – через реку Чёрная речка в реку Томь в пределах города Новокузнецка;

ООО «Водоканал» – в реку Томь на территории Новокузнецкого муниципального района;

АО «Шахта «Большевик» – в реку Есаулка;

АО «ЕВРАЗ ЗСМК» («НКМК») – в реку Конобениха;

АО «Завод «Универсал», АО «Кузнецкие ферросплавы» – в реку Кульяновка;

ООО «Шахта «Абашевская» – в реку Каменушка;

АО «ЕВРАЗ ЗСМК» – в озеро Узкое;

ООО «ЭкоДэнд» – в ручей Маркина.

В Новокузнецке основными источниками загрязнения поверхностных вод выступают предприятия жилищно-коммунального сектора, а также компании, занимающиеся металлургией и добычей угля.

Обсуждение

Полученные в ходе данного исследования результаты согласуются с данными ранее опубликованных научных работ, но позволяют уточнить динамику

и вклад различных источников в загрязнение. Выявленное высокое содержание в воздухе бенз(а)пирена (6,3 ПДК) и формальдегида (3,95 ПДК) согласуется с выводами работ Бугаевой М.С. (2026) и Глебовой Л.А. (2025) о том, что именно эти вещества являются главными приоритетными загрязнителями, формирующими настораживающие и неприемлемые уровни канцерогенного и неканцерогенного риска для здоровья населения Новокузнецка.

Сравнение с другими городами-участниками ФП «Чистый воздух». По данным еженедельного мониторинга Росгидромета за декабрь 2024 года, Новокузнецк находился на третьем месте в России по уровню загрязнения атмосферного воздуха, уступив лишь Чите и Красноярску. Это указывает на то, что, несмотря на реализацию федерального проекта, по масштабам проблемы Новокузнецк остаётся в числе безусловных лидеров по загрязнению наряду с другими крупнейшими промышленными агломерациями страны.

Оценка эффективности природоохранных мероприятий. Зафиксированное в результатах снижение валовых выбросов от стационарных источников на 30% по сравнению с 2017 годом является прямым следствием выполнения комплексных планов мероприятий по снижению выбросов в рамках ФП «Чистый воздух». Наиболее значимый вклад в этот процесс вносят предприятия чёрной и цветной металлургии. Как показал анализ корпоративных отчётов, ЕВРАЗ ЗСМК модернизировал систему охлаждения коксового газа, что позволило сократить выбросы специфических ароматических углеводородов на 85%, а реализация проекта по строительству комплекса серогазоочистки на аглофабрике обеспечит снижение выбросов диоксида серы на 70%. Аналогичные мероприятия, включая переход на технологию «сухой» газоочистки и внедрение технологии «ЭкоСодерберг», реализуются на АО «Кузнецкие ферросплавы» и АО «РУСАЛ Новокузнецк». Сравнивая эти результаты с проблемой загрязнения водных объектов, следует отметить, что основным стимулом для модернизации очистных сооружений на промышленных предприятиях выступает не добровольная инициатива, а принуждение со стороны надзорных органов, включая судебные иски природоохранного прокурора.

Заключение

В ходе выполнения научно-исследовательской работы удалось реализовать все поставленные задачи, что позволило нам сформулировать следующие ключевые выводы.

В целом по городу уровень загрязнения воздуха в 2024 году характеризовался как высокий. Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха в Новокузнецке являются крупные металлургические предприятия, такие как ЕВРАЗ ЗСМК, АО «Кузнецкие ферросплавы» и АО «РУСАЛ Новокузнецк». Автомобильный транспорт также вносит существенный вклад в общий уровень загрязнения, что подчеркивает необходимость комплексного подхода к решению экологической проблемы. Новокузнецк продолжает оставаться в числе самых загрязнённых городов Российской Федерации, что подтверждается высокими уровнями загрязнения атмосферного воздуха и водных объектов. Проблемы, связанные с загрязнением

водных объектов неочищенными промышленными стоками, сохраняются, что представляет угрозу для экосистем региона и требует комплексного подхода к решению. Полученные данные могут быть использованы для разработки и корректировки экологических программ и стратегий, направленных на улучшение качества атмосферного воздуха и водных ресурсов в Новокузнецке и Кемеровской области.

Результаты исследования могут служить методологической основой для мониторинга и оценки эффективности внедряемых мероприятий по снижению уровня загрязнения, что позволит обеспечить более обоснованный подход к управлению экологическими рисками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бугаева М.С., Бондарев О.И. Экологические риски и морфологические особенности канцерогенеза у населения промышленного города. – Текст: электронный // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2026. – URL: <https://zniso.fcgie.ru/jour/article/view/2988/> (дата обращения: 01.05.2026).
2. Глебова Л.А., Коськина Е.В., Бачина А.В. Оценка риска для здоровья населения промышленных центров Кузбасса в связи с загрязнением атмосферного воздуха. – Текст: электронный // Анализ риска здоровью. – 2025. – № 4. – URL: <https://journal.fcisk.ru/2025/4/4> (дата обращения: 01.05.2026).
3. Двуреченский В.Г., Соколов Д.А., Топоровская А.А., Берлякова О.Г. Почвенно-экологическое состояние урбанизированных территорий Западной Сибири (на примере г. Новокузнецка). – Текст: электронный // Вестник Томского государственного университета. – 2024. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pochvenno-ekologicheskoe-sostoyanie-urbanizirovannyh-territoriy-zapadnoy-sibiri-na-primere-g-novokuznetska> (дата обращения: 05.05.2026).
4. Андропова Д.Д., Нижегородцева Ю.Е., Гудков А.А. Экологические подходы к формированию общественных приречных пространств как инструмент развития водно-зеленого каркаса города Новокузнецка. – Текст: электронный // Строительство, наука и образование. – 2024. – № 2. – С. 113-148. – DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.4. – URL: <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.2.4> (дата обращения: 06.05.2026).
5. Козлов А., Середюк И. В Кузбасс прибыл министр природных ресурсов и экологии России Александр Козлов. – Текст: электронный // Комсомольская правда. – 10.07.2025. – URL: <https://www.kem.kp.ru/online/news/6464259/> (дата обращения: 10.05.2026).
6. Созонова Н. Новокузнецк стал лидером по загрязнённости в Кузбассе: в каких районах дышалось хуже всего. – Текст: электронный // НК ТВ. – 14.10.2025. – URL: <https://nk-tv.com/309429.html> (дата обращения: 10.05.2026).
7. Чернышёва И. Формальдегид, сероводород и оксид азота: чем дышат новокузнецчане и какой район самый чистый. – Текст: электронный // Городская газета «Новокузнецк». – 16.10.2025. – URL: <https://novokuznetsk.su> (дата обращения: 10.05.2026).
8. Серогазоочистка на ЕВРАЗ ЗСМК сократит выбросы диоксида серы на 70%. – Текст: электронный // Уральский бизнес-журнал «УрБК». – 15.05.2025. – URL: <https://urbc.ru/1068136501-v-novokuznecke-dostroili-bashni-serogazoochistki-aglofabriki-evraz-zsmk.html> (дата обращения: 14.05.2026).

© В. А. Гладырева, Л. Ю. Анощенко. 2026

В. В. Меркулов^{1,2✉}, И. И. Бочкарева¹

Оценка воздействия на окружающую среду и экологическая безопасность

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²ИП Меркулова И. А.
e-mail: vovanmerkulov@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) как превентивная мера в рамках экологической безопасности. Проблема экологической безопасности остаётся одной из самых важных в современном мире. К сожалению, человечество направляет недостаточное число практических действий на реализацию природоохранных мероприятий, а также сохранение биологического баланса. Выполнение оценки воздействия на окружающую среду дает возможность выявлять и оценивать предполагаемые риски от планируемой хозяйственной деятельности. В работе дан небольшой исторический ракурс разработки и внедрения ОВОС в России, рассмотрены основные нормативно-правовые акты (НПА) и главные принципы ОВОС, как части системы экологической безопасности.

Ключевые слова: оценка воздействия на окружающую среду, экологическая безопасность, хозяйственная деятельность

V. V. Merkulov^{1,2✉}, I. I. Bochkareva¹

Environmental impact assessment and environmental safety

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

²Individual entrepreneur Merkulova I. A.
e-mail: vovanmerkulov@mail.ru

Abstract. This article examines environmental impact assessment (EIA) as a preventative measure within the framework of environmental safety. Environmental safety remains one of the most pressing issues in the modern world. Unfortunately, humanity devotes insufficient practical efforts to implementing environmental protection measures and maintaining biological balance. Conducting an environmental impact assessment allows one to identify and assess the potential risks of planned economic activities. This paper provides a brief historical perspective on the development and implementation of EIA in Russia, examining the main regulatory legal acts (RLAs) and the main principles of EIA as part of the environmental safety system.

Keywords: Environmental impact assessment (EIA), environmental safety, economic activity

Введение

Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) предусматривает комплекс действий по выявлению, анализу и прогнозированию всех последствий, начиная с изменений в природе, а также социальных, экономических, культурных и других изменений от реализации планируемой хозяйственной и иной деятельности. Тема важности оценки воздействия на окружающую среду не является новой в

кругах специалистов-экологов, проектировщиков хозяйственных объектов. Тем не менее, зачастую недооценивается важность прогнозирования и выявления экологических рисков на стадии проектирования перед осуществлением хозяйственной деятельности человека, а также в процессе дальнейшей эксплуатации объекта. Данная тема не придается широкому освещению и поэтому большое число людей не обладает полнотой информации по этому вопросу.

Целью работы является рассмотрение значимости оценки воздействия на окружающую среду для создания устойчивой системы экологической безопасности. В статье будут даны критерии выполнения ОВОС и ее результаты, история появления ОВОС в России, а также основные нормативные документы, регулирующие правила выполнения ОВОС.

Взаимодействие человека с окружающим миром

Человек во все времена неизменно взаимодействует с окружающей средой. Для продолжения рода и комфортного проживания он вынужден приспособлять окружающий мир под себя. В результате этих преобразований и вытекает понятие воздействия на окружающую среду. Человек влияет на окружающую среду, тем самым изменяя ее исходные параметры и, конечно, в большинстве случаев в худшую сторону.

Как итог, в течении 5000-6000 лет существования человеческой цивилизации воздействие на окружающую среду приобрело невероятные масштабы. Только за сутки из-за эрозии, засухливой погоды, а также по причине неумелого управления Земля теряет около 33 тыс. га плодородных земель [1]. В результате пожаров, причиной которых в 90% случаев является человек, а также безостановочной вырубки ежедневно в мире пропадает около 27000 га леса [2]. Можно привести множество аналогичных примеров регрессивных процессов в окружающей среде вследствие вмешательства человека. Они говорят о том, что в результате антропогенного воздействия окружающая среда стремительно деградирует, не успевая восстанавливаться к исходным показателям. Отрицательное воздействие происходит намного быстрее процессов регенерации компонентов биосферы.

Да, это очевидно, что мы не можем полностью отказаться от воздействия на окружающую среду, но регулировать силу и направление воздействий нам подвластно. Для этого необходимо лишь желание и воля людей. Появились различные механизмы подобного регулирования. Одни из них направлены на лимитирование природопользования, другие – на ограничение и контроль действующих предприятий, третьи занимаются вопросами ликвидации ущерба и восстановления природных ресурсов. Но первым в ряду мер по защите окружающей среды и создании системы экологической безопасности стоит ОВОС. С него начинается любое планирование хозяйственной деятельности.

ОВОСом называют процесс анализа, выявления, прогнозирования прямых, а также косвенных воздействий на окружающую среду в результате хозяйственной деятельности (в основном планируемой) человека для дальнейшей оценки последствий. По результатам ОВОС осуществляется государственная экологи-

ческая экспертиза, в которой устанавливается возможность или невозможность перехода к фактическим шагам по реализации проектных решений.

История развития нормативной базы ОВОС в России

Юридической основой появления ОВОС в России считают выход нормативно-правового акта СНиП 1.02.01-85 «Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектно-сметной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений» от 1986 года, в котором указывались рекомендации по наличию в проектной документации раздела, содержащего оценку оптимальности принимаемых технологических решений с позиции экологических стандартов[3]. Однако в связи с тем, что в то время природоохранная нормативная база была достаточно сырой, а также статус документа был рекомендательным, данную инструкцию долгое время не выполняли.

Позже были приняты: требование Государственного комитета СССР по охране природы (1988 г.) и Постановление Верховного Совета СССР (1989 г.) «О неотложных мерах по экологическому оздоровлению страны» [4,5]. Но оба этих документа также не дали должного стимула исполнителям к выполнению раздела ОВОС.

Только в 1992 г. территориальные органы Госкомприроды (нын. Минприроды России) начали отказывать в экспертных заключениях проектной документации без полноценного раздела ОВОС. Этим был дан толчок к полноценному соблюдению документа «Временные инструкции о порядке проведения оценки воздействия на окружающую среду при разработке технико-экономических обоснований и проектов строительства народнохозяйственных объектов и комплексов» введенного 18.05.1990 г.[6]. В результате этот законодательный документ был положен в основу современных НПА, регулирующих процессы в данной области.

Документация ОВОС

На сегодняшний день основополагающими документами в России, регламентирующими процессы выполнения ОВОС, являются следующие НПА:

- Федеральный закон № 7-ФЗ ст. 32 «Об охране окружающей среды» введен в 2002 г. [7]. Это главный закон в стране, определяющий специфику деятельности в сфере экологии, а также природопользования;
- Федеральный закон № 174-ФЗ «Об экологической экспертизе», введен в 1995 г. [8]. Это документ, регламентирующий порядок прохождения экологической экспертизы, а также устанавливающий требования к проектной документации;
- Постановление правительства РФ № 1644 «О порядке проведения оценки воздействия на окружающую среду», дата вступления в силу 2025 г.[9]. Актуальный на сегодняшний момент документ, который полноценно определяет порядок выполнения ОВОС в РФ.

Данные НПА являются ключевыми документами, в соответствии с которыми выполняется процесс разработки раздела ОВОС. При этом проектная документация не должна противоречить ни одному из требований этих НПА.

Говоря о проведении ОВОС нельзя не сказать о процедуре проверки документации Государственной экологической экспертизой. Данная процедура оценивает соответствие проектной документации требованиям НПА. Основным законопроектом, регулирующим деятельность в области экологической экспертизы, является федеральный закон № 174 «Об экологической экспертизе» [10].

Главные принципы ОВОС

Любая хозяйственная деятельность человека неизменно производит отрицательное влияние на компоненты биосферы. В связи этим логичен вопрос — насколько экономически целесообразно строить объект, если затраты на его производство и дальнейшую извлекаемую прибыль будут многократно превышать урон, наносимый этим же самым объектом природе.

В Указе Президента РФ № 440 «О концепции перехода РФ к устойчивому развитию» от 1996 г. четко определены национальные стратегии в области экологического права и указаны требования по сохранению баланса между хозяйственной экономической деятельностью человека и охраной окружающей среды [11]. В данном Указе сформулированы принципы, при котором урон окружающей среде должен стремиться к минимальному уровню, исходя из технических условий. Кроме того, в нем обозначено, что первостепенным является сохранение экологического баланса, а не извлекаемая технико-экономическая выгода из производственной деятельности.

При разработке ОВОС главные моменты заключаются в следующем:

- Анализ границ антропогенного воздействия от объекта (возможность внесения корректировок на этапе проекта);
- Текущий анализ природной среды и окружающей экологической ситуации в районе проектирования;
- Прогнозирование предполагаемых воздействий от планируемой хозяйственной деятельности (оценка потенциальной возможности ухудшения экологической обстановки);
- Стоимостная оценка нанесенного экологического ущерба от хозяйственной деятельности;
- Разработка перечня основных природоохранных мероприятий для нивелирования вреда, причинённого в процессе производства работ и дальнейшей эксплуатации;
- Сравнение экономической выгоды объекта и нанесенного вреда окружающей среде;
- Перечень мероприятий для программы экологического мониторинга (ПЭМ) на основных стадиях производства работ.

В результате разработки раздела «Оценка воздействия на окружающую среду» ключевой задачей является определение степени и границ антропогенного воздействия. ОВОС также включает рассмотрение и проработку иных вариантов строительства и эксплуатации объекта, при котором может быть нанесен минимальный урон от планируемой деятельности. Этим самым именно ОВОС является началом создания системы экологической безопасности как планируемого объекта хозяйственной деятельности, так и территории, попадающей под его влияние.

Заключение

Главным фактором полноценного законодательного внедрения «Оценки воздействия на окружающую среду» можно считать возможность своевременного обнаружения и ликвидации нежелательных процессов для биосферы еще на стадии проектной документации. При необходимости вносятся изменения, корректировки, а также уточнения в проекте для максимального сохранения баланса между экономической деятельностью человека и окружающей средой. Корректировка проектной документации в экономическом плане обходится намного дешевле, чем устранение нежелательных воздействий уже после строительства и в процессе эксплуатации объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Desertification and land degradation // Food and agriculture organization of the United Nations [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fao.org/in-action/action-against-%09desertification/overview/desertification-and-land-degradation/en/> (дата обращения: 18.05.2026).
2. Ученые подсчитали, сколько тропических лесов теряет Земля каждые пять секунд // Nakedscience[Электронный ресурс]. URL: <https://naked-science.ru/article/biology/how-many-trees> (дата обращения: 18.05.2026).
3. СНиП 1.02.01*85. Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектно-сметной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений / Госстрой СССР – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 40 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293839/4293839500.pdf> (дата обращения: 18.05.2026).
4. Постановление Совета Министров СССР от 8 апреля 1988 года N 436 «Об организационной структуре Государственного комитета СССР по охране природы». URL: <https://docs.cntd.ru/document/765704569> (дата обращения: 18.05.2026).
5. Постановление Верховного Совета СССР от 27 ноября 1989 года «О неотложных мерах экологического оздоровления страны» URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=ESU&n=752#ONfISKVSkLJbpp5r> (дата обращения: 18.05.2026).
6. Временная инструкция Государственного комитета СССР по охране Природы от 18.05.1990 г. «О порядке проведения оценки воздействия на окружающую среду при разработке технико-экономических обоснований (расчетов) и проектов строительства народнохозяйственных объектов и комплексов» URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294847/4294847956.pdf> (дата обращения: 18.05.2026).
7. Закон Российской Федерации «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/ (дата обращения: 18.05.2026).
8. Закон Российской Федерации «Об экологической экспертизе» от 23.11.1995 № 174-ФЗ URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/ (дата обращения: 18.05.2026).
9. Постановление правительства Российской Федерации «О порядке проведения оценки воздействия на окружающую среду» от 28.11.2024 № 1644 URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_491757/ (дата обращения: 18.05.2026).
10. Закон Российской Федерации "Об экологической экспертизе" от 23.11.1995 № 174 URL: <https://docs.cntd.ru/document/9014668> (дата обращения: 18.05.2026).
11. Указ Президента Российской Федерации «О Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию» от 01.04.1996 № 440 URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/9120> (дата обращения: 18.05.2026).

© В. В. Меркулов, И. И. Бочкарева, 2026

А. С. Утвенко^{1✉}, И. И. Бочкарева²

Использование побочных продуктов производства в деятельности горнообогатительного комбината

¹ООО «Нерюнгри-Металлик», г. Нерюнгри, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: alina.utvenko@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается один из эффективных способов повышения экологической культуры производства на горнодобывающем комплексе. На предприятии введены в действия технические условия по переводу отходов отработанных шин в побочный продукт производства – элементы строительные из отработанных шин, утративших товарные свойства. Объектом исследования являются крупногабаритные шины R-49, образованные при эксплуатации грузовых и легковых автомобилей, колесных погрузчиков и большегрузных автосамосвалов при проведении технического обслуживания, текущих и капитальных ремонтов данной техники, а также другие резинотехнические изделия. Проведенное исследование обосновывает целесообразность внедрения технических условий на использование отходов. Данная практика станет толчком для расчета экономической и экологической эффективности перевода других производственных отходов в побочные продукты производства.

Ключевые слова: Побочные продукты производства, отходы, стандартизация

A. S. Utvenko^{1✉}, I. I. Bochkareva²

Use of by-products in the mining and processing plant's operations

¹LLC Neryungri-Metallik, Neryungri, Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail :alina.utvenko@yandex.ru

Abstract. The article examines one of the effective methods of improving the environmental culture of production in the mining complex. The enterprise has implemented technical specifications for converting waste from used tires into a by-product of production – construction elements made from used tires that have lost their marketable properties. The research object is large-sized R-49 tires generated during the operation of trucks and passenger cars, wheel loaders, and heavy-duty dump trucks during maintenance, current, and major repairs of this equipment, as well as other rubber products. The conducted study substantiates the feasibility of implementing technical specifications for the use of waste. This practice will serve as a stimulus for calculating the economic and environmental efficiency of converting other production wastes into by-products.

Keywords: By-products of production, waste, standardization

Введение

На предприятиях горнодобывающего комплекса одной из ключевых проблем является образование производственных отходов 3-5 классов опасности: масло, покрышки отработанные. Разработка технических условий является эффективным

инструментом экологических стандартов для перевода образованных отходов во вторичные материальные ресурсы.

Целью данной работы является оценка эффективности применения технических условий на перевод производственных отходов горнообогатительного комбината в побочные продукты производства (ППП).

Задачами данной работы являются:

- анализ нормативно-правовой базы в области перевода отходов в побочные продукты производства;
- основные технические требования к побочным продуктам производства;
- экономическая эффективность внедрения технических условий.

Практическая значимость от внедрения технических условий обусловлена, главным образом, снижением уровня негативного воздействия на окружающую среду в части обращения с отходами, и как следствие экономическую эффективность в виде снижения платы за обращение с отходами.

Методы и материалы

Технические условия (ТУ) на побочную продукцию утверждаются, если на предприятии не введены другие документы стандартизации, технические регламенты (ТР) и ГОСТы [1, 3].

При введении документов по стандартизации нужно разделять правовое регулирование «отходов», «побочных продуктов производства» и «вторичного сырья».

Для введения в действие технических условий на побочные продукты их формируют согласно требованиям нормативных-правовых актов и документов стандартизации:

- Федерального закона от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» и его подзаконных актов;
- Федерального закона от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» и его подзаконных актов;
- ГОСТ 2.114-2016 «Единая система конструкторской документации. Технические условия»;
- ГОСТ Р 1.3-2018 «Стандартизация в Российской Федерации. Технические условия на продукцию. Общие требования к содержанию, оформлению, обозначению и обновлению»;
- Технических регламентов, ГОСТ и ГОСТ Р, сводов правил, которые касаются побочной продукции, безопасности, упаковки и маркировки, контроля, транспортирования и хранения продукции.

Элементы строительные из отработанных шин, утративших товарные свойства, в соответствии с разработанным техническим условием применяются для:

- строительства опор для трубопроводов, отбойников на речных пристанях, противоэрозионных укреплений откосов отвалов, противопаводковых сооружений;
- ландшафтного дизайна;
- укрепления дорожных знаков, указателей, аншлагов;

- укрепления старых деревянных мостов, крутых и обрывистых берегов;
- изготовления опор ЛЭП;
- укладки колец колодцев и т.д.

Побочные продукты образуются при эксплуатации автотранспортной и горной техники.

Строительные элементы из отработанных шин, утративших товарные свойства – образуются вследствие переработки побочных продуктов, указанных в табл.1.

Таблица 1. Характеристика побочных пробуктов

Наименование побочного продукта	Состав	
	Наименование компонента	Содержание, %
Покрышки пневматических шин с тканевым кордом отработанные	тканевый корд	11,2
	резина	86,1
	бортовая проволока	2,7
Покрышки пневматических шин с металлическим кордом отработанные	тканевый корд	4,8
	металлический корд	7,5
	резина	82,1
	бортовая проволока	4,79
Камеры пневматических шин автомобильных отработанные	резина	99
	латунь	1

Транспортирование материалов проводится в соответствии с ГОСТ 12.3.020 любым видом транспорта крытого типа, обеспечивающих их сохранность от повреждений.

Побочные продукты необходимо складировать на специально подготовленной площадке с грунтовым покрытием без тары штабелями, исключаящей ее загрязнение или засорение. С площадки накопления побочные продукты производства транспортируются внутри предприятия по месту требования.

Строительные элементы из отработанных шин по ГОСТ 30244 относятся к группе горючих материалов, средней воспламеняемости, класс по токсичности продуктов горения – умерено опасный.

Основным видом негативного воздействия на окружающую среду является загрязнение природных сред в результате неорганизованного размещения, захоронения или сжигания отходов материалов.

Утилизация отходов строительных материалов при производстве продукции осуществляется на договорной основе с организациями, имеющими лицензию на обращение с отходами.

Экономическая эффективность внедрения технических условий обусловлена экономией бюджетных средств на закупку готовых изделий.

В соответствии с проектом нормативов образования отходов и лимитов на их размещение (ПНООЛР) годовой объем отработанных шин составляет 218 тонн. Для утилизации ежегодных объемов образования отходов отработанных шин в бюджет необходимо заложить затраты на транспортировку и утилизацию отходов, что особенно затратно в условиях северных регионов.

При использовании элементов строительных из отработанных шин в собственном производстве главным элементом экономии выступает стоимость готовых изделий при закупке. Основным вид использования побочного продукта – создание опорных и защитных колец, организация ландшафта.

Альтернативой элементов строительных из отработанных шин, использующихся в производстве, являются бетонные кольца. Сравнительная характеристика шин и бетонных колец представлена в табл. 2.

Таблица 2. Характеристика ресурсов

Название ресурса	Вес 1 шт, т	Цена 1 шт., руб.	Кол-во шт/год	Кол-во рейсов для транспортировки	Кол-во материалов в 1 рейсе
Элементы строительные из отработанных шин, утративших товарные свойства (шина R-49)	0,17	0	1 282	0	0
Бетонное кольцо КС-10-90	0,66	9 700	335	13	31

Стоимость логистики в удаленные регионы (усредненно, по коммерческим предложениям предприятия Б.) составляет более 3 728 310 руб, транспортировка осуществляется в 20-футовом контейнере. Для расчета затрат на приобретение бетонных колец потребуется:

$$З_{б/к} = K_{об} \times C_{шт} + K_p \times C_p, \quad (1)$$

где $Z_{б/к}$ – затраты на приобретение бетонных колец в год, руб.; $K_{об}$ – необходимое количество колец в год; $C_{шт}$ – стоимость одного кольца, шт; K_p – необходимое количество рейсов в год; C_p – стоимость одного рейса.

Поставив исходные данные из табл. 2 в формулу (1) получаем затрат на приобретение бетонных колец:

$$Z_{б/к} = 335 \times 9\,700 + 13 \times 3\,728\,310 = 48\,478\,065$$

При использовании элементов строительных из отработанных шин в производстве нет статьи для затрат на покупку бетонных колец. Подготовка шин для использования производится силами сотрудников предприятия, и не требует дополнительных вложений.

Результаты

Использование таких мер стандартизации, как внедрение технических условий на предприятии по переводу отходов производства в побочные продукты производства является примером рационального использования ресурсов. Такой подход демонстрирует соблюдение международных и российских стандартов в области природопользования [2, 3].

Экономическая эффективность от использования побочных продуктов производства рассматривается, главным образом, как экономия на закупке новых материалов для производства работ.

Заключение

Анализ нормативно-правовой базы в области перевода отходов в побочные продукты производства показал, что практика перевода отходов широко применима. На территории Российской Федерации введены федеральные законы и ГОСТы четко регламентирующие требования к оформлению необходимой документации.

В техническом условии на побочные продукты производства указываются технические требования к сырью, требования к безопасности и охране окружающей среды, требования к транспортировке и хранению, а также разработаны указания по применению.

Экономическая эффективность внедрения технических условий обусловлена целесообразностью экономии бюджетных средств при использовании уже имеющихся на производстве ресурсов по сравнению с приобретением необходимых ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаев, Ф.Ф., Смирнова, Т.С., Голуб, О.В., Марьев, В.А. (2021) Реализация стратегии развития отходов перерабатывающей отрасли в России, Экономика устойчивого развития, № 2 (46), с. 42-46.
2. Егорова, Г. И. Отходы нефтехимических производств : монография / Г. И. Егорова, И. В. Александрова, А. Н. Егоров. – Тюмень : ТИУ, 2014. — 126 с. — ISBN 978-5-9961-0823-7. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/64533> (дата обращения: 23.05.2026). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Зиновьева, О.А. (2023) Реализация Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года, Вестник Университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА), № 3 (103), с. 137-145.
4. Смирнова, Т.С., Голуб, О.В. (2024) Мониторинг реализации отраслевой программы «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в промышленном производстве», Экономика устойчивого развития, № 2 (58), с. 231-235.
5. Толстых, Т.О., Гераськина, А.А., Щелчков, К.А. (2024а) Перспективы экономики замкнутого цикла в России на этапе глобальных вызовов, Экономика устойчивого развития, № 2 (58), с. 250-257.
6. Толстых, Т.О., Гераськина, А.А., Щелчков, К.А. (2024б) Подходы к формированию критериев оценки эффективности промышленных симбиозов, Регион: системы, экономика, управление, № 2 (65), с. 113-124.

© А. С. Утвенко, И. И. Бочкарева, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

1. А. В. Андрющенко, Д. А. Гура. Сравнительный анализ нейросетевых архитектур для задач топографического дешифрирования.....	3
2. Ф. Р. Валишев, С. С. Шемяков, А. А. Ерофеев. Спутниковое геодезическое обеспечение цифрового двойника объекта дорожной инфраструктуры в криолитозоне	8
3. Б. В. Содномов, В. Н. Черных, А. А. Аюржанаев, Е. Ж. Гармаев. Оценка влияния наледей на инженерные сооружения в Селенгинском среднегорье с использованием методов ДЗЗ.....	17
4. П. В. Воронина. Сравнительный анализ динамики снежного покрова в Новосибирской области по данным метеорологических и спутниковых наблюдений (2000–2024 гг.).....	24
5. Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, С. А. Ярутин, Т. А. Тихонов. Подход к формированию синтетических данных лазерного сканирования промышленных объектов	31
6. Р. А. Дьяченко, А. Н. Заколпина, С. А. Ярутин. Подход к формированию данных лазерного сканирования городской застройки на основе синтетических сцен	37
7. А. Ю. Мельничук, М. А. Баширов. Технология обработки космических снимков с идентификацией неиспользуемых сельскохозяйственных земель	44
8. И. В. Овсянников, С. А. Рылов. Веб-сервис мониторинга атмосферных осадков по данным камер видеонаблюдения на основе глубокого обучения	49
9. М. Е. Сиденко, С. А. Рылов. Гибридный алгоритм выделения водной поверхности по спутниковым снимкам Sentinel-2 на основе глубокого обучения и кластерного анализа.....	55
10. С. К. Фарбер, Н. С. Кузьмик, А. А. Мартынов. Оптимизация затрат на строительство лесовозных дорог	62
11. Д. А. Шатилов, С. А. Рылов. Оценка эффективности методов аугментации для обучения CNN-моделей на малых мультиспектральных выборках.....	67
12. В. В. Гололобов, Н. Н. Завалишин. Аппроксимация расходов воды кусочно-квадратической функцией от уровня воды по постам Верхней Оби....	73

13. Б. Х. Имомназаров, Х. Х. Имомназаров, И. К. Искандаров. Бегущие поперечные волны в пористой среде.....	79
14. А. И. Крылова, Н. А. Лаптева. Схематизация Обь-Иртышского бассейна. Предварительные результаты моделирования.....	84
15. Д. Д. Лаврентьев, М. С. Хайретдинов, О. А. Копылова. Частотно-векторные характеристики транспортных колебаний в разных рабочих режимах	91
16. С. В. Михайлюта, А. А. Леженин, Г. Г. Дульцева. Загрязнение атмосферного воздуха г. Красноярска за последние 40 лет (с 1988 по 2025 гг.) по показателю ИЗА ₅	99
17. А. В. Михеева. Динамика корреляционного параметра в области подготовки землетрясений по данным глобального каталога ВЛ	104
18. А. М. Осипова, А. А. Якименко. Платформа для экспериментов по локализации акустического источника с учётом факторов окружающей среды	112
19. Ю. В. Перепечко, В. Н. Доровский. Разрушение насыщенной жидкостью горной породы	120
20. А. С. Хорунженко. Влияние силы Кориолиса на распространение цунами в Японском море.....	128
21. Э. Н. Шорина, Д. М. Евменова, И. Н. Ельцов, С. А. Имашев, А. А. Якименко. Разработка программного инструментария для анализа индикаторов землетрясений по данным электромагнитного мониторинга на Бишкекском геодинимическом полигоне	137
22. Д. А. Шульгин, А. А. Якименко. Цифровая платформа для обработки и анализа геоэлектромагнитных данных мониторинга	145
23. С. А. Тесленок, Э. А. Лебедев, Е. И. Колесникова, А. А. Скурихин. Исследования изменений ландшафтной структуры нефтегазового региона (на примере Ханты-Мансийского автономного округа – Югры).....	150
24. К. Н. Дубровин, Л. В. Илларионова, Е. А. Фомина. Усовершенствование системы мониторинга пахотных земель Хабаровского края с использованием спутниковых мультиспектральных данных	158
25. С. А. Чигридов, Е. Н. Кулик. HARMONY: мобильная станция экологического мониторинга на базе общественного транспорта.....	164
26. Е. Л. Касьянова, Д. Ш. Бахтиярова, Э. Р. Мирмахмудов, Р. М. Наврузов, Д. А. Абжапарова. О топографо - геодезическом обеспечении окрестности андижанского водохранилища.....	171

27. С. В. Жила, Е. А. Артемихина, И. В. Фурьев. Пирофитность сосны (<i>Pinus sylvestris</i> L.): исследование адаптивных реакций древесины на лесные пожары в Прибайкалье методом термогравиметрии.....	179
28. Н. А. Алексеенко, И. В. Зацаринный, К. Н. Гриппа. Изучение влияния антропогенной трансформации среды на населения птиц в промышленно освоенных горных районах Арктики с помощью картографического метода	186
29. И. В. Васильцова, И.О. Исмаилова, Л.Ю. Гуленков, Ю.И. Коваль. Содержание кислоторастворимых форм тяжёлых металлов в почвах г. Новосибирска	193
30. Т. О. Перемитина, И. Г. Яценко. Спутниковая оценка восстановления экосистемы после аварийного разлива нефтепродуктов в Арктической зоне	200
31. Г. А. Иванова, В. А. Иванов, Е. А. Кукавская, П. Д. Третьяков. Мониторинг воздействия пожаров разной интенсивности на древостои сосняков Средней Сибири	205
32. В. А. Соколов, О. П. Втюрина, А. А. Злобин. О стратегии развития лесного сектора России.....	211
33. В. А. Иванов, Г. А. Иванова. Методические основы классифицирования лесной территории по опасности возникновения пожаров от гроз	219
34. Н. В. Петрова, Д. В. Васендин, А. Д. Петров. Отходы производства и потребления: региональный разрез (на примере Новосибирской области) в контексте общероссийских показателей.....	224
35. О. А. Савченко, Н. Ф. Чуенко, М. В. Рева, А. Ю.Луговская. Оценка влияния условий Арктической зоны, антиоксидантов и рациона питания в эксперименте на лабораторных животных	231
36. И. Г. Фюттик, О. В. Колодяжная. Формирование логистических хабов в России и их влияние на состояние окружающей среды.....	236
37. И. И. Бочкарева, В. П. Зайцев. Экологические проблемы урбанизированных территорий.....	244
38. И. М. Ламков, Д. В. Панов, Л. А. Головина. К вопросу природоохранной деятельности на обводненных карьерах	250
39. С. П. Казьмин, О. В. Климов. Климатический феномен малого ледникового периода и его экологические последствия.....	255
40. Д. К. Нгуен, О. Н. Николаева. О выборе территориальных единиц картографирования для моделирования экологической обстановки города	262

41. В. А. Гладырева, Л. Ю. Анопченко. Экологическая обстановка г. Новокузнецка	270
42. В. В. Меркулов, И. И. Бочкарева. Оценка воздействия на окружающую среду и экологическая безопасность	276
43. А. С. Утвенко, И. И. Бочкарева. Использование побочных продуктов производства в деятельности горнообогатительного комбината.....	281

CONTENTS

1. A. V. Andryushchenko, D. A. Gura. <u>Comparative analysis of neural network architectures for topographic interpretation tasks</u>	3
2. F. R. Valishev, S. S. Shemykov, A. A. Erofeev. <u>Satellite geodetic support for a digital twin of a road Infrastructure facility in the cryolithozone</u>	8
3. B. V. Sodnomov, V. N. Chernikh, A. A. Ayurzhanaev, E. Zh. Garmaev. <u>Assessment of icings on engineering structures in the Selenginsk middle mountains using the remote sensing method</u>	17
4. P. V. Voronina. <u>Comparative analysis of snow cover dynamics in the Novosibirsk region based on meteorological and satellite observations (2000–2024)</u>	24
5. R. A. Dyachenko, D. A. Gura, S. A. Yarutin, T. A. Tikhonov. <u>An approach to the formation of synthetic laser scanning data for industrial facilities</u>	31
6. R. A. Dyachenko, A. N. Zakolpina, S. A. Yarutin. <u>An approach to generating laser scanning data for urban development based on synthetic scenes</u>	37
7. A. Yu. Melnichuk, M. A. Bashirov. <u>Technology for processing satellite images with identification of unused agricultural lands</u>	44
8. I. V. Ovsyannikov, S. A. Rylov. <u>A web service for atmospheric precipitation monitoring from CCTV cameras based on deep learning</u>	49
9. M. E. Sidenko, S. A. Rylov. <u>A hybrid algorithm for water surface segmentation from Sentinel-2 satellite images using deep learning and cluster analysis</u>	55
10. S. K. Farber, N. S. Kuzmik, A. A. Martynov. <u>Cost optimization of logging road construction</u>	62
11. D. A. Shatilov, S. A. Rylov. <u>Evaluating augmentation method effectiveness for CNN training on small multispectral datasets</u>	67
12. V. V. Gololobov, N. N. Zavalishin. <u>Approximation of water flow rates by a piecewise quadratic function of water level at the Upper Ob stations</u>	73
13. Bh. Kh. Imomnazaro, Kh. Kh. Imomnazaro, I. K. Iskandarov. <u>Traveling shear waves in a porous medium</u>	79
14. A. I. Krylova, N. A. Lapteva. <u>Schematics of the Ob-Irtysh basin. Preliminary simulation results</u>	84
15. D. D. Lavrentev, M. S. Khayretdinov, O. A. Kopylova. <u>Frequency-vector characteristics of vehicle vibrations in different operating modes</u>	91
16. S. V. Mikhailuta, A. A. Lezhenin, G. G. Dultseva. <u>Urban air pollution in Krasnoyarsk over 40 years (1988–2025): trends in the API5 index</u>	99
17. A. V. Mikhееva. <u>Dynamics of the correlation parameter in the earthquake preparation area according to the BJI global catalog</u>	104

18. A. M. Osipova, A. A. Yakimenko. <u>A platform for experiments on acoustic source localisation, taking environmental factors into account</u>	112
19. Yu. V. Perepechko, V. N. Dorovsky. <u>Destruction of rocks saturated with liquid</u>	120
20. A. S. Khorunzhenko. <u>Impact of the coriolis force on tsunami propagation in the Japan Sea</u>	128
21. E. N. Shorina, D. M. Evmenova, I.N. Yeltsov, S. A. Imashev, A. A. Yakimenko. <u>Development of software tools for analyzing earthquake indicators based on electromagnetic monitoring data at the Bishkek geodynamic polygon</u>	137
22. D. A. Shulgin, A. A. Yakimenko. <u>Digital platform for processing and analysis of geoelectromagnetic monitoring data</u>	145
23. S. A. Teslenok, E. A. Lebedev, E. I. Kolesnikova, A. A. Skurikhin. <u>Research on changes in the landscape structure of the oil and gas region (using the example of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra)</u>	151
24. K. N. Dubrovin, L. V. Illarionova, E. A. Fomina. <u>Improving the cropland monitoring system in Khabarovsk Krai using satellite multispectral data</u>	158
25. S. A. Chigridov, E. N. Kulik. <u>HARMONY: mobile environmental monitoring station based on public transport</u>	164
26. E. L. Kasyanova, D. Sh. Bakhtiyarova, E. R. Mirmakhmudov, R. M. Navruzov, D. A. Abzhaparova. <u>About topographical and geodetic support of the terrain near the andijan reservoir</u>	171
27. S. V. Zhila, E. A. Artemikhina, I. V. Furyaev. <u>Pyrophytic properties of Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.): Study of adaptive responses of wood to forest fires in the Baikal region using thermogravimetry</u>	179
28. N. A. Alekseenko, I. V. Zatsarinny, K. N. Grippa. <u>A study of the impact of anthropogenic environmental transformation on bird populations in industrially developed mountainous regions of the arctic using the cartographic method</u>	186
29. I. V. Vasiltsova, I. O. Ismagilova, L. Yu. Gulenkov, Y. I. Koval. <u>Content of acid-soluble heavy metals in soils</u>	193
30. T. O. Peremitina, I. G. Yashchenko. <u>Satellite assessment of ecosystem recovery after an emergency oil spill in the Arctic zone</u>	200
31. G. A. Ivanova, V. A. Ivanov, E. A. Kukavskaya, P. D. Tretyakov. <u>Monitoring the impact of fires of varying intensity on stands of pine forests in Central Siberia</u>	205
32. V. A. Sokolov, O. P. Vtyurina, A. A. Zlobin. <u>On the development strategy for the Russian forest sector</u>	211
33. V. A. Ivanov, G. A. Ivanova. <u>Methodological bases of classification of forest territory by the risk of fires from lightning</u>	219
34. N. V. Petrova, D. V. Vasendin, A. D. Petrov. <u>Production and consumption waste: a regional breakdown (using the Novosibirsk region as an example) in the context of national indicators</u>	224

35. O. A. Savchenko, N. F. Chuenko, M.V. Reva, A.Y. Lugovskaya. <u>Evaluation of the influence of Arctic zone conditions, antioxidants and diet in an experiment on laboratory animals</u>	231
36. I. G. Fyutik, O. V. Kolodyazhnaya. <u>The formation of logistics hubs in Russia and their impact on the environment</u>	236
37. I. I. Bochkareva, V. P. Zaitsev. <u>Environmental problems of urbanized territories</u>	244
38. I. M. Lamkov, D. V. Panov, L. A. Golovina. <u>On the issue of environmental protection in flooded quarries</u>	250
39. S. P. Kazmin, O. V. Klimov. <u>The little ice age climate phenomenon and its environmental consequences</u>	255
40. D. Q. Nguyen, O. N. Nikolaeva. <u>On the selection of territorial mapping units for modelling the ecological situation of a city</u>	262
41. V.A. Gladyreva, L. Yu. Anopchenko. <u>The ecological situation of Novokuznetsk</u>	270
42. V. V. Merkulov, I. I. Bochkareva. <u>Environmental impact assessment and environmental safety</u>	276
43. A. S. Utvenko, I. I. Bochkareva. <u>Use of by-products in the mining and processing plant's operations</u>	281

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 9 т.

Т.4

Международная научная конференция

«ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ФОТОГРАММЕТРИЯ, МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ГЕОЭКОЛОГИЯ»

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *А. Бочарникова*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 01.09.2026. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 17,03. Тираж 25 экз. Заказ 158.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Издательско-полиграфический центр СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8