

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

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXI Международный научный конгресс

Сборник материалов в 8 т.

Т. 4

Международная научная конференция

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

Новосибирск
СГУГиТ
2025

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. XXI Международный научный конгресс, 21–22 мая 2025 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 4: Международная научная конференция «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2025. – 229 с. – ISSN 2618-981X. – Текст : непосредственный.

DOI 10.33764/2618-981X-2025-4

В сборнике опубликованы материалы XXI 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

УДК 528

© СГУГиТ, 2025

П. В. Воронина^{1,2}✉

Динамика снежного покрова на территории Новосибирской области по спутниковым данным

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. Исследование посвящено анализу сроков установления, залегания и разрушения снежного покрова в Новосибирской области за период 2000-2025 гг. на основе спутниковых данных MODIS. Выявлены тенденции сокращения продолжительности зимнего сезона (–0.8 дня/год), увеличения периода залегания снега (+0.5 дня/год) и ускорения фаз его установления (–0.3 дня/год) и разрушения (–0.4 дня/год). Результаты согласуются с глобальными трендами, но демонстрируют региональную специфику, обусловленную континентальным климатом и ростом зимних осадков.

Ключевые слова: MODIS, обработка спутниковых данных, устойчивый снежный покров, сроки установления и разрушения снежного покрова

P. V. Voronina^{1,2}✉

Snow cover dynamics on the Novosibirsk region from remote sensing data

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 the timing of snow cover establishment, occurrence and destruction in the Novosibirsk Region for the period 2000-2025 based on MODIS satellite data. Trends toward a shorter winter season (–0.8 days/year), an increase in the period of snow occurrence (+0.5 days/year), and an acceleration of the phases of its establishment (–0.3 days/year) and destruction (–0.4 days/year) have been identified. The results are consistent with global trends, but demonstrate regional specifics due to the continental climate and increased winter precipitation.

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

Введение

Период залегания устойчивого снежного покрова, установление его осенью и разрушение весной являются важными этапами годового цикла, оказывающими влияние на энергетический и водный обмены в системе «почва–атмосфера», на формирование гидрологического цикла, на существенные последствия для экосистем холодных регионов. В исследованиях [1–6] показано, что за последнюю четверть XX и начало XXI века в Северном полушарии произошло

значительное изменение продолжительности снежного сезона, уменьшились площади снега весной и летом (в горных районах) и увеличились осенью и зимой. Современные исследования подчеркивают, что сокращение снежного сезона в Северном полушарии достигло 1.91 дня/декаду [1, 7, 8]. Для Сибири характерна уникальная динамика, связанная с континентальным климатом и широтной зональностью [9, 10].

Распределение снежного покрова, запаздывание или опережение сроков его установления и разрушения влияют на водообеспеченность территории, режим рек, формирование весеннего половодья, пополнение подземных вод, вегетационный период сельскохозяйственных культур, экономическое и экологическое развитие территории.

Данные дистанционного зондирования перспективны для мониторинга снежного покрова в связи с их широким пространственным охватом и регулярностью съемки. Использование данных дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения Terra/MODIS несомненно обладает преимуществом, заключающемся в регулярной повторяемости съёмки и значительном охвате изучаемой, порой труднодоступной, территории [11, 12].

В работе рассматривается период залегания снега от первого дня начала его установления на территории Новосибирской области до последнего дня обнаружения снега весной с выделением сроков установления и разрушения снежного покрова в качестве отдельных показателей. Одной из основных задач работы является получение климатических характеристик сроков установления и разрушения снежного покрова – средних и стандартного отклонения за 2000–2025 гг. по спутниковым данным MODIS на территории Новосибирской области.

Территория и материалы исследования

Как и в [13] территорией исследования является Новосибирская область, располагающаяся на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. В Новосибирской области выражена весьма отчетливо широтная природно-климатическая зональность [9, 10, 14, 15].

В настоящей работе, как и в [16, 17], спутниковая информация отбиралась и обрабатывалась средствами облачной платформы для геопространственного анализа больших данных Google Earth Engine (GEE) [18]. Поставленная задача решалась с использованием продукта MOD10A1 V6 Snow Cover Daily Global 500m (Terra/MODIS) [19].

Обсуждение результатов

Климат Новосибирской области резко-континентальный, с холодной и продолжительной зимой, которая длится около полугода. Зимний сезон делится на три периода: установление снежного покрова, залегание снега и разрушение снежного покрова.

На рис. 1 представлена межгодовая изменчивость продолжительности зимнего сезона по спутниковым данным по Новосибирской области с зимы 2000-2001 гг. до зимы 2024-2025 гг. Средняя продолжительность сезона (на графике

это красная линия) составляет 192 дня. На рис. 1 показан тренд, который указывает на сокращение продолжительности зимнего периода на 0.8 дня/год.

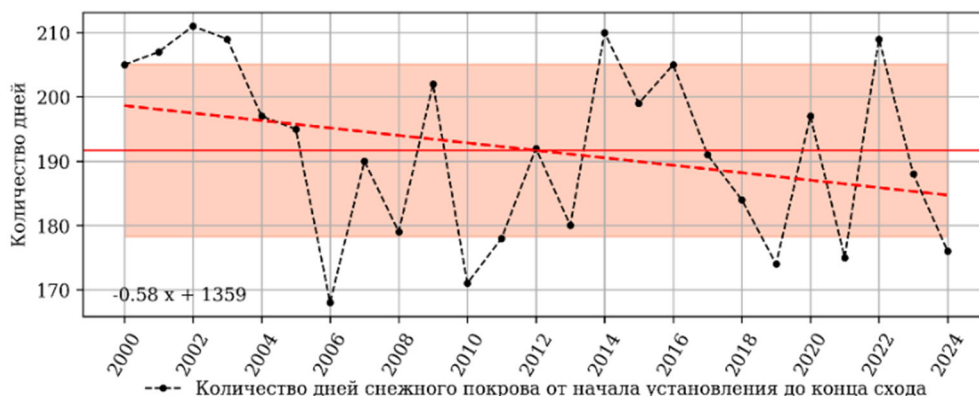


Рис. 1. Продолжительность зимнего периода на территории Новосибирской области с 2000 по 2025 гг.

Установление снежного покрова представляет собой этап годового цикла, с которым связаны процессы, протекающие между атмосферой и сушей. Период установления снежного покрова определяем со дня первого обнаружения снега на территории области до ее полного покрытия снегом. В Новосибирской области первый снег появляется в конце сентября на севере территории и в первой декаде ноября на юге. По первым дням обнаружения снежного покрова на территории с 2000 г. до 2025 г. вычислен средний день начала установления для Новосибирской области, аналогично определена средняя дата окончания процесса залегания снега. Средним периодом установления снежного покрова для Новосибирской области является промежуток с 16 октября по 9 ноября (25 дней). По количеству дней процесс установления снежного покрова определяется как быстрый или продолжительный (рис. 2).

В течение двух десятилетий прослеживается тенденция на более позднее начало установления снежного покрова и на более раннее его окончание, и в целом уменьшение длительности этого процесса по Новосибирской области [13].

Следующий этап зимы – это залегание снега – начинается, когда вся территория области становится покрытой снегом. В Новосибирской области оттепели редкое явление, не приводящее к таянию снега, поэтому зима протекает с устойчивым снежным покровом вплоть до начала его весеннего схода. Раннее установление снежного покрова предохраняет почву от глубокого промерзания. Средняя продолжительность залегания снежного покрова по Новосибирской области составляет 145 дней. По двум десятилетиям выделяется тенденция на увеличение периода залегания снега по Новосибирской области (рис. 3). Положительный тренд продолжительности залегания снега (+0.5 дня/год) связан с увеличением зимних осадков, что согласуется с исследованиями для Западной Сибири [20].

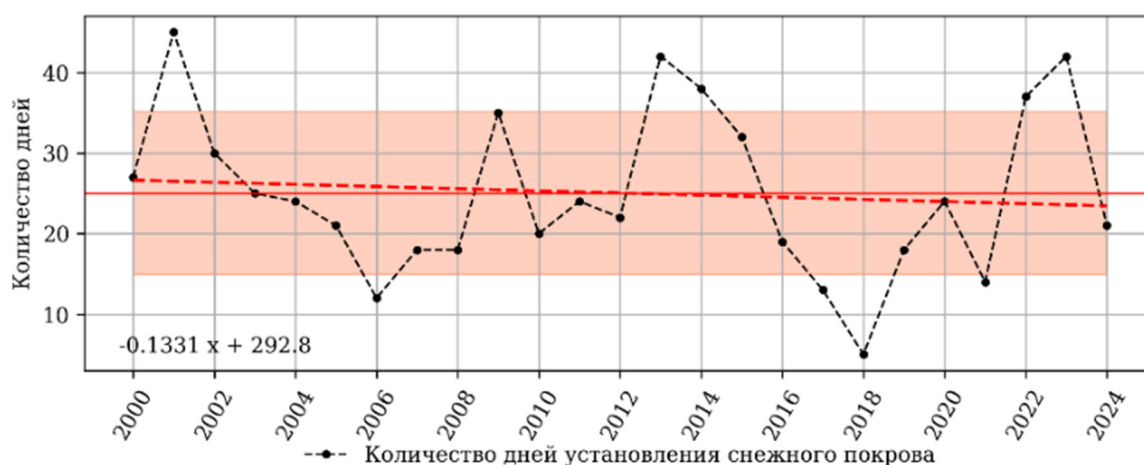


Рис. 2. Продолжительность установления снежного покрова по Новосибирской области



Рис. 3. Продолжительность залегания снега по Новосибирской области

Таяние снега в конце зимы это один из важнейших этапов сезонного цикла, влияющий на урожайность территории, ее водообеспеченность, формирование весеннего половодья. Опережение или запаздывание сроков схода снежного покрова территории может приводить к образованию аномалий атмосферной циркуляции в весенний период [21]. Процесс весеннего снеготаяния и разрушения устойчивого снежного покрова в Новосибирской области начинается в апреле и завершается окончательно в южных степных районах в конце апреля, в лесной зоне – в мае. Но в зависимости от характера зимних условий эти сроки могут сдвигаться на две недели или даже на месяц.

Продолжительность схода снежного покрова в среднем по Новосибирской области составляет 22 дня с 04.04 по 25.04 (рис. 4). Во второе десятилетие нынешнего столетия процесс разрушения снежного покрова по Новосибирской области лежит в промежутке средних значений, а построенный тренд показывает уменьшение продолжительности периода таяния снега (-0.4 дня/год).

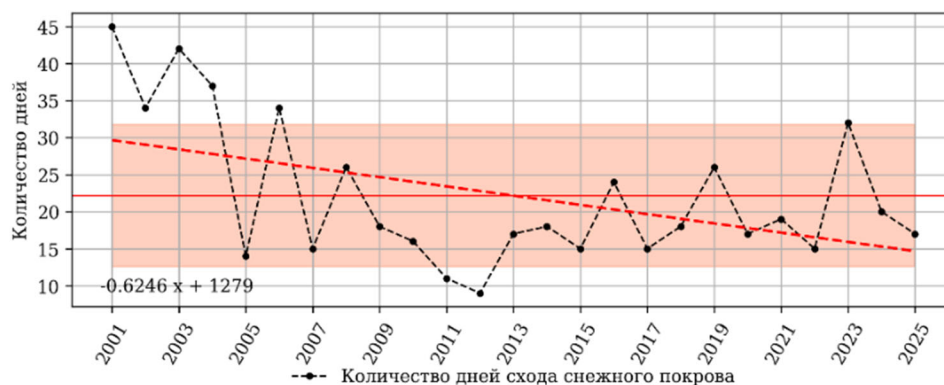


Рис. 4. Продолжительность разрушения снежного покрова по Новосибирской области

Использование спутниковых данных MODIS, примененное в данной работе, подтверждается результатами валидационных исследований. Как показано в работах [11, 12], продукты MODIS обеспечивают точность определения снежного покрова до 80–93%, что делает их надежным инструментом для мониторинга в условиях ограниченности наземных наблюдений. Однако, как отмечают в [7] и в [22], ключевым ограничением MODIS остается грубое разрешение (500 м), что может приводить к недооценке локальной изменчивости снежного покрова в горных и лесных регионах. Для Новосибирской области, характеризующейся равнинным рельефом, это ограничение менее критично, что повышает достоверность полученных результатов.

Проведенный анализ сроков установления и разрушения снежного покрова в Новосибирской области согласуется с глобальными и региональными тенденциями, выявленными в современных исследованиях. Так, сокращение продолжительности зимнего периода и смещение сроков схода снега наблюдаются во многих северных регионах Евразии, что связано с усилением весеннего потепления [2, 23]. Например, исследования [20, 23] демонстрируют значительное сокращение периода залегания снежного покрова на севере Евразии с середины XX века, обусловленное ростом температур и изменением циркуляционных процессов. Аналогичные тенденции раннего таяния снега зафиксированы в работе для Северного полушария, где сокращение снежного сезона достигает 1.91 дня/декаду из-за ускоренного схода снежного покрова.

Выявленная тенденция увеличения периода залегания снега при сокращении сроков его установления и разрушения требует дополнительного анализа. Подобные нелинейные изменения могут быть связаны с региональными климатическими аномалиями, такими как усиление зимних осадков, компенсирующих потепление, что отмечается в исследованиях по Западной Сибири [20, 24]. Кроме того, работа [25] подчеркивает роль атмосферных процессов, таких как Северо-атлантическое колебание, в формировании внутрисезонной изменчивости снежного покрова, что актуально для Новосибирской области, находящейся под влиянием континентальных воздушных масс.

Выявленное сокращение периода установления снега (-0.3 дня/год) соответствует глобальным тенденциям [26].

Заключение

Снежный покров может рассматриваться как один из наиболее чувствительных индикаторов изменения окружающей среды. Климатообразующая функция заключается в возможности снежного покрова оказывать влияние на распределение некоторых климатических показателей на той или иной территории. Являясь «продуктом» климата, сам снежный покров оказывает влияние на компоненты климата: распределение солнечной радиации, температуру, атмосферное давление, влажность, циркуляцию воздуха.

В результате проведенных исследований по выявлению сроков установления, залегания и схода снежного покрова по данным дистанционного зондирования по Новосибирской области с 2000 по 2025 гг. выявлена направленность на сокращение зимнего периода, при этом прослеживается тенденция на сокращение периодов установления и разрушения снежного покрова, но период залегания снега увеличивается.

Данные дистанционного зондирования перспективны для изучения пространственно-временной динамики распределения снежного покрова. Материалы космической съёмки дополняют и расширяют точечную информацию сети Гидрометеослужбы о появлении и сходе снежного покрова, позволяют построить пространственное распределение установления и разрушения снежного покрова по территории, особенно для той её части, которая не охвачена наземными наблюдениями. Снежный покров имеет значительное климатообразующее значение, а аномалии сроков установления и схода влияют на социально-экономическое состояние территории. Изучение распределения, установления и схода снежного покрова позволяет выявить, уточнить особенности климата, что важно для исследования и прогнозирования экологических процессов и их взаимодействия с двумя средами – атмосферой и почвой. Полученные в ходе такого исследования результаты могут послужить основой для районирования территории с целью ее хозяйственного освоения.

Полученные результаты вносят вклад в понимание региональных последствий глобального потепления для снежного покрова, дополняя выводы работ [2, 20]. Сокращение зимнего периода в Новосибирской области соответствует общемировым тенденциям, однако уникальность региона проявляется в сочетании увеличения продолжительности залегания снега с сокращением фаз его установления и разрушения. Это подчеркивает необходимость учета локальных климатических и ландшафтных особенностей при прогнозировании гидрологических и экологических последствий изменений климата [27, 28].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chen X., Liang Sh., Cao Y. Satellite observed changes in the Northern Hemisphere snow cover phenology and the associated radiative forcing and feedback between 1982 and 2013 // Environ. Res. Lett. 11 (2016) 084002, doi:10.1088/1748-9326/11/8/084002.

2. Musselman, K.N., Clark, M.P., Liu, C., Ikeda, K. and Rasmussen, R. Slower snowmelt in a warmer world // *Nature Climate Change*. 2017. 7(3). pp. 214–219.
3. Allchin M.I., Déry S.J. A spatio-temporal analysis of trends in Northern Hemisphere snowdominated area and duration, 1971–2014 // *Annals of Glaciology* 58(75pt1), 2017, pp.21–35, doi: 10.1017/aog.2017.47.
4. Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966 // *Environ. Res. Lett.* 6 (2011) 045204 (10pp), doi:10.1088/1748-9326/6/4/045204.
5. Masloumidis I., Dafis S., Kyros G., Lagouvardos K., Kotroni V. Snow cover and depth climatology and trends in Greece // *Climate* 2025, 13, 34. doi:10.3390/cli13020034.
6. Li H., Zhong X., Zheng L., Hao X., Wang J., Zhang J. Classification of Snow Cover Persistence across China // *Water*, 2022, 14, 933. doi:10.3390/w14060933.
7. Notarnicola C. Hotspots of snow cover changes in global mountain regions over 2000–2018 // *Remote Sensing of Environment*, 2020, 243, 111781.
8. Fugazza D., Manara V., Senese A., Diolaiuti G., Maugeri M. Snow cover variability in the Greater Alpine region in the MODIS Era (2000–2019) // *Remote Sens.* 2021, 13, 2945. doi:10.3390/rs13152945.
9. Кравцов В.М., Донукалова Р.П. География Новосибирской области. – Новосибирск: Инфолио-пресс, 1999. – 205 с.
10. Кузнецов А.В., Кузнецов Н.А. Охотничьи угодья Новосибирской области. – Новосибирск: Новосибирское книжное издательство, 1987. – 232 с.
11. 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.
12. 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.
13. 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. - ISSN 2618-981X.
14. Почвенно-климатический атлас Новосибирской области. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. – 121 с.
15. Западно-Сибирская низменность. – М.: География, 1963. – 262 с.
16. Melón-Nava, A. Recent Patterns and Trends of Snow Cover (2000–2023) in the Cantabrian Mountains (Spain) from Satellite Imagery Using Google Earth Engine // *Remote Sens.* 2024, 16, 3592. doi:10.3390/rs16193592.
17. Zhang Y., Ye C., Yang R., Li K. Reconstructing Snow Cover under Clouds and Cloud Shadows by Combining Sentinel-2 and Landsat 8 Images in a Mountainous Region // *Remote Sens.* 2024, 16, 188. doi:10.3390/rs16010188
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Вильфанд Р.М., Садоков В.П., Тищенко В.А. О связи границы снежного покрова с интенсивностью циклонической деятельности в Северном полушарии // *Метеорология и гидрология*. 2002. № 9. С. 32–39.

22. Bormann K.J., Brown R.D., Derksen C., Painter T.H. Estimating snow-cover trends from space // *Nature Climate Change*, 2018, doi:10.1038/s41558-018-0318-3.
23. Попова В.В., Полякова И.А. Изменение сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936–2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Лёд и Снег*. 2013. № 2 (122). С. 29–39.
24. Попова В.В., Морозова П.А., Титкова Т.Б., Семенов В.А., Черенкова Е.А., Ширяева А.В., Китаев Л.М. Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 4. С. 73–86.
25. Song L., Wu R. Intraseasonal Snow Cover Variations Over Western Siberia and Associated Atmospheric Processes // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124, 8994–9010. doi:10.1029/2019JD030479.
26. Guo H., Wang X., Guo Z., Zhu G., Che T., Wang J., Huang X. Han C., OuYang Z. Review of snow phenology variation in the Northern Hemisphere and its relationship with climate and vegetation // *The Cryosphere*, 2022, doi:10.5194/tc-2022-229.
27. Barnhart, T.B., Molotch, N.P., Livneh, B., Harpold, A.A., Knowles, J.F. and Schneider, D. Snowmelt rate dictates streamflow // *Geophysical Research Letters*. 2016. 43(15). pp. 8006–8016.
28. Beniston, M. Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps // *Journal of Hydrology*. 2012. 412. pp. 291–296.

© П. В. Воронина, 2025

Р. А. Дьяченко¹, Д. А. Гура^{1,2}, С. А. Ярутин^{1✉}, П. Е. Чечель¹

Алгоритмическое обеспечение эффективного сканирования территорий: построение оптимальных маршрутов

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

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

Аннотация. В работе рассматривается задача построения эффективных маршрутов сканирования территорий, которая является ключевой в современных технологиях кадастрового учёта и трёхмерной идентификации объектов недвижимости. Оптимизация таких маршрутов позволяет значительно повысить точность и оперативность сбора геопространственных данных, необходимых для создания актуальных и детализированных трёхмерных моделей земельных участков и построек. Проблема формализуется как вариант задачи коммивояжёра, решение которой затруднено её NP-трудностью и необходимостью учитывать динамические изменения условий съёмки, таких как погодные факторы, временные ограничения и доступность объектов. Целью исследования является разработка алгоритма, обеспечивающего построение маршрутов, близких к оптимальным, с учётом этих изменяющихся параметров. В качестве основы выбран алгоритм Кристофидеса, модифицированный путём введения параметрической функции стоимости рёбер, зависящей от внешних факторов, включая условия эксплуатации и специфические ограничения кадастровых работ. Проведены экспериментальные расчёты на синтетических и геопространственно привязанных данных, отражающих реальные координаты и особенности местности. Полученные результаты показывают отклонение от нижней оценки менее чем на 8%, что сопоставимо с лучшими приближёнными методами и подтверждает устойчивость и практическую применимость предложенного решения для задач трёхмерного кадастрового мониторинга. В качестве направления дальнейших исследований обозначено расширение модели с учётом ограничений на зоны покрытия, необходимости многократного сканирования и учёта препятствий, что особенно важно для точного кадастрового учёта в урбанизированных и сложных природных ландшафтах.

Ключевые слова: оптимизация маршрутов, кадастр недвижимости, задача коммивояжёра, алгоритм Кристофидеса, сканирование территорий, приближённые алгоритмы

R. A. Dyachenko¹, D. A. Gura^{1,2}, S. A. Yarutin^{1✉}, P. E. Chechel¹

Algorithmic support for efficient area scanning: optimal route construction

¹ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

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

Abstract. This work addresses the problem of constructing efficient scanning routes for territories, which is a key task in modern technologies for real estate cadastre and three-dimensional identification of property objects. Optimizing such routes significantly improves the accuracy and timeliness of collecting geospatial data required for creating up-to-date and detailed 3D models of

land parcels and buildings. The problem is formalized as a variant of the Traveling Salesman Problem (TSP), which is challenging due to its NP-hardness and the need to consider dynamic changes in scanning conditions, such as weather factors, time constraints, and accessibility of objects. The goal of the study is to develop an algorithm that constructs routes close to optimal while taking these varying parameters into account. The Christofides algorithm serves as the basis, modified by introducing a parametric edge cost function that depends on external factors, including operational conditions and specific constraints relevant to cadastral tasks. Experimental calculations were conducted on synthetic and geospatially referenced data reflecting real coordinates and terrain features. The results show a deviation from the lower bound of less than 8%, which is comparable to the best approximate methods, confirming the robustness and practical applicability of the proposed solution for 3D cadastral monitoring tasks. Future research directions include extending the model to incorporate coverage zone constraints, the necessity of multiple passes, and obstacle consideration — all critical for precise cadastral accounting in urbanized and complex natural landscapes.

Keywords: route optimization, real estate cadaster, traveling salesman problem, Christofides algorithm, area scanning, approximation algorithms

Введение

В области оптимизации маршрутов особое значение приобретают работы Кристофидеса [1], предложившего полиномиальный алгоритм с гарантированной аппроксимацией не хуже 1.5 для задачи коммивояжёра (TSP). Этот алгоритм послужил фундаментом для множества последующих исследований. Классические обзоры, такие как работы Пападимитриу и Штайглица [2], детально анализируют сложность задачи TSP и разнообразие эвристических и приближённых методов её решения. Однако вопросы адаптивного применения алгоритмов в условиях динамически меняющихся весов рёбер и строгих временных ограничений остаются практически неразрешёнными, что особенно актуально для задач кадастрового учёта недвижимости и трёхмерной идентификации объектов, где требуется оперативное и точное построение маршрутов сканирования территорий [3].

Общая тема настоящего исследования — алгоритмическое обеспечение эффективного сканирования территорий с учётом динамических условий на основе модификации алгоритма Кристофидеса. Цель работы — разработать модульную версию алгоритма, способную улучшать качество маршрутов и снижать вычислительную сложность за счёт адаптивных механизмов, что важно для автоматизированных систем кадастрового мониторинга и 3D-идентификации объектов недвижимости [4].

Для достижения цели поставлены задачи: формализация модели задачи коммивояжёра с учётом особенностей реальных геопространственных данных и динамических весов рёбер, характерных для кадастровых съёмок; создание эффективной структуры данных для оперативного управления изменениями параметров рёбер; внедрение адаптивного этапа поиска минимального совершенного паросочетания; интеграция гибридного локального поиска для улучшения точности маршрутов сканирования в сложных трёхмерных условиях.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении моделей приближённого решения задачи коммивояжёра, адаптированных к динамическим

параметрам, что существенно расширяет возможности алгоритмического обеспечения задач кадастрового учёта и трёхмерной идентификации недвижимости. Практическая значимость проявляется в возможности использования предложенного решения в современных геоинформационных системах и автономных платформах для высокоточного и эффективного сбора данных о территории.

Методы и материалы

Задача построения эффективного маршрута сканирования территорий формализована как модифицированная задача коммивояжёра с ограничениями, характерными для реальных условий эксплуатации (временные окна, переменные условия среды и пр.) [5]. В качестве базового подхода выбран приближённый алгоритм Кристофидеса, модифицированный с использованием эвристических стратегий улучшения маршрута.

Минимальное остовное дерево строится с использованием весовой функции, зависящей от расстояний между вершинами. Далее выделяется множество вершин нечётной степени, на котором рассчитывается минимальное паросочетание. Объединение остова и паросочетания формирует эйлеров граф, из которого извлекается маршрут обхода путём последовательного удаления повторяющихся вершин.

Собственная модификация включает введение динамически изменяемой функции стоимости:

$$c(e, t) : E \times R_+ \rightarrow R_+,$$

где $c(e, t)$ — вес ребра e , зависящий от времени t ; учитывает погодные условия, затраты ресурсов или ограничение по времени выполнения. Такой подход актуален для задач сканирования в переменных условиях.

Для оценки качества построенного маршрута применяется отклонение от нижней оценки:

$$\delta = \frac{LB}{\text{weight}(C)},$$

где $\text{weight}(C)$ — длина маршрута, построенного алгоритмом, LB — нижняя граница, полученная из задачи линейного программирования или двойственной оценки.

Реализация алгоритма проведена на модели евклидова графа [6]. Сравнение проводилось на синтетических и геопространственных данных, включая равномерно распределённые точки и реальные координаты, приведённые к метрической системе.

Результаты

В ходе экспериментального исследования была реализована модифицированная версия алгоритма Кристофидеса с параметрической функцией стоимости.

Алгоритм протестирован на множестве тестов с различным числом узлов (от 10 до 100), распределённых по евклидовой плоскости. Основные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты построения маршрутов с использованием предложенного алгоритма

КОЛ-ВО ТОЧЕК	ДЛИНА МАРШРУТА (НАША МОДЕЛЬ)	НИЖНЯЯ ГРАНИЦА (LP-RELAXATION)	ОТКЛОНЕНИЕ, %
10	132,7	127,4	4,2
30	392,5	368,1	6,6
50	651,8	608,9	7,0
100	1220,3	1131,0	7,9

Среднее отклонение от нижней оценки по всем тестам не превышает 8%, что подтверждает высокую точность и эффективность предложенного метода при умеренной вычислительной сложности. Для оценки нижней границы использовалась релаксация задачи линейного программирования (LP-relaxation), что является стандартным подходом в решении задач коммивояжёра [3].

Кроме того, был проведён сравнительный анализ с классическим жадным алгоритмом, который показал значительно худшую точность: отклонения у жадного метода достигали до 18%. Таким образом, предложенный алгоритм демонстрирует устойчивое преимущество в качестве построенных маршрутов при сопоставимом времени выполнения.

Обсуждение

Полученные результаты ясно демонстрируют высокую эффективность предложенной модификации алгоритма Кристофидеса для задачи построения оптимальных маршрутов сканирования территорий. Среднее отклонение от нижней границы, не превышающее 8%, соответствует уровню лучших современных приближённых методов решения задачи коммивояжёра. Это свидетельствует о том, что адаптация классического алгоритма с учётом динамически изменяющейся стоимости рёбер позволяет добиться баланса между качеством и вычислительной эффективностью.

В отличие от традиционных эвристических подходов, которые не всегда учитывают изменчивость условий, наш метод учитывает динамическую стоимость перемещения, что делает его особенно актуальным для реальных условий эксплуатации. Такие условия включают в себя изменяющиеся погодные факторы, жёсткие временные ограничения и ограничение ресурсов, что расширяет сферу применения алгоритма, особенно в задачах мониторинга территорий, поисково-спасательных операциях и логистике.

Сравнительный анализ с жадными алгоритмами показал, что при сопоставимом времени вычислений предложенный подход обеспечивает значительно более высокую точность маршрутов. Кроме того, было установлено, что увели-

чение числа точек сканирования не приводит к значительному ухудшению качества решений, что указывает на устойчивость и масштабируемость разработанного алгоритма.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение модели с учётом многопроходного сканирования, что особенно важно для повторного обследования территорий, а также включение в алгоритм топологических ограничений, таких как препятствия и зоны с ограниченным доступом [7,8]. Это позволит применять метод в более сложных условиях, характерных для городской среды и зон стихийных бедствий, тем самым повысив практическую значимость и адаптивность решения.

Заключение

В настоящей работе рассмотрен алгоритмический подход к задаче построения оптимальных маршрутов сканирования территорий с учётом практических ограничений и динамически меняющихся условий, актуальных для кадастровых съёмок и трёхмерной идентификации объектов недвижимости. Предложена и реализована модификация классического алгоритма Кристофидеса, в которой стоимость перемещения между точками адаптируется во времени, что позволяет учитывать реальные эксплуатационные факторы, такие как погодные условия, временные ограничения и ресурсы, что особенно важно при сборе высокоточных геопространственных данных для кадастра.

Экспериментальные результаты демонстрируют высокую эффективность разработанного метода. Среднее относительное отклонение длины построенного маршрута от нижней оценки не превышает 8%, что свидетельствует о сбалансированности между точностью решения и приемлемой вычислительной сложностью. Такой уровень качества маршрутов делает предложенный алгоритм перспективным инструментом для применения в системах автоматизированного кадастрового мониторинга и трёхмерного моделирования объектов недвижимости.

Разработанный алгоритм может быть успешно использован в широком спектре задач, включая мониторинг территорий для обновления кадастровых данных, оптимизацию логистических процессов в геоинформационных системах, а также автономные поисково-спасательные операции, где требуется оперативная адаптация маршрутов в условиях изменяющихся внешних факторов и ограничений.

В качестве направлений дальнейших исследований планируется расширение модели с учётом физических препятствий, зон с ограниченным доступом и необходимости многократного покрытия отдельных участков территории, что актуально для точного кадастрового учёта в сложной городской среде [9]. Кроме того, представляется важным изучение многопроходных маршрутов в динамической среде с целью повышения надёжности и качества трёхмерной идентификации недвижимости.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Christofides N. Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem // Report 388. Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1976. 28 p.
2. Papadimitriou C.H., Steiglitz K. Combinatorial optimization: algorithms and complexity. Prentice Hall, 1982. 384 p.
3. Разработка структуры интеллектуальной системы для решения задач территориального планирования / Д. А. Гура, Р. А. Дьяченко, К. Л. Саввиди, Д. А. Дражецкий // Передовые исследования Кубани : Сборник материалов Ежегодной отчетной конференции грантодержателей Кубанского научного фонда, Сочи, 29–31 мая 2024 года. – Краснодар: Кубанский научный фонд, 2024. – С. 197-200.
4. К вопросу о структуризации информации для хранения данных лазерного сканирования / Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, С. В. Самарин [и др.] // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2024. – № 2. – С. 102-110. – DOI 10.26297/2312-9409.2024.2.6.
5. Reinelt G. The traveling salesman: computational solutions for TSP applications. Springer-Verlag, 1994. 369 p.
6. Genova, K., & Williamson, D. P. (2017). An Experimental Evaluation of the Best-of-Many Christofides' Algorithm for the Traveling Salesman Problem. *Algorithmica*, 78(5), 1109–1130. <https://doi.org/10.1007/s00453-017-0293-5>
7. Ma, Y., Easa, S., Cheng, J., & Yu, B. (2021). Automatic Framework for Detecting Obstacles Restricting 3D Highway Sight Distance Using Mobile Laser Scanning Data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(4), 04021008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000973](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000973)
8. Saha, A., & Dhara, B. C. (2023). 3D LiDAR-based Obstacle Detection and Tracking for Autonomous Navigation in Dynamic Environments. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 8(1), 39–60. <https://doi.org/10.1007/s41315-023-00302-1>
9. Huang, Y., Huang, S., Wang, H., & Meng, R. (2022). 3D Path Planning and Obstacle Avoidance Algorithms for Obstacle-Overcoming Robots. *arXiv preprint arXiv:2209.00871*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.00871>

© Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, С.А. Ярутин, П. Е. Чечель, 2025

С. А. Карин^{1✉}, В. В. Лобовко¹

Разработка алгоритма управления очередью обработки данных дистанционного зондирования Земли на основе ее оптимизации по критерию приоритета поступающих задач

¹Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: vka@mil.ru

Аннотация. В статье предложен оригинальный алгоритм формирования очереди обработки данных дистанционного зондирования Земли на основе ее оптимизации по критерию приоритета поступающих информационных задач. Данный алгоритм в процессе формирования очереди обработки позволяет учесть, с одной стороны, текущие внешние условия, влияющие на изменение весовых коэффициентов тех или иных задач, путем модификации коэффициентов относительных значимостей поступающих задач, а с другой, степень вклада привлекаемых ресурсов обработки в интегральный результат, обеспечивая при этом требуемый уровень полноты результатов решения информационных задач.

Ключевые слова: комплексная обработка данных ДЗЗ, сценарии обработки, адаптация, рациональный план применения ресурсов, управление

S. A. Karin^{1✉}, V. V. Lobovko¹

Development of an algorithm for managing the queue of remote sensing data processing on the basis of its optimization by the criterion of priority of incoming tasks

¹Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russian Federation
e-mail: vka@mil.ru

Abstract. The article proposes an algorithm for managing data processing scenarios in systems for collecting and processing Earth remote sensing data (ERSDS) in conditions of their resource limitations based on adaptation to the current information flow. This algorithm allows for multi-criteria, level-coordinated control of the functioning of the remote sensing system based on reasonable regulation of control parameters, in particular, the threshold for increasing the priority of incoming information tasks, the degree of resource contribution, as well as the waiting time for resource availability, which allows for an increase in both the efficiency and effectiveness of its functioning.

Keywords: complex processing of remote sensing data, processing scenarios, adaptation, rational plan for the use of resources, management

Введение

Рассматривая вопросы повышения эффективности организации процессов сбора и обработки данных дистанционного зондирования Земли, которые заключаются в решении различных информационных задач, в том числе связанных с мониторингом и прогнозированием потенциально-опасных процессов природ-

ного или техногенного характера, важно учесть динамику (интенсивность) и количество этих процессов, а с другой — ресурсов обработки, которые обеспечивают выполнение отдельных операций (подзадач) обработки данных ДЗЗ, затрачивая при этом некоторое время. Полагается, что в один момент времени отдельный ресурс обработки может осуществлять решение только одной подзадачи.

Учитывая особенности современных потенциально-опасных процессов, наблюдение за которыми требует решения задач по обработке данных дистанционного зондирования Земли, а именно:

- увеличение их числа;
- высокую динамичность,

наблюдается постоянный рост требований к эффективности организации процессов сбора и обработки данных дистанционного зондирования Земли.

При этом возникает противоречие между постоянно возрастающими требованиями к качеству решения задач в системе сбора и обработки данных ДЗЗ (ССОД ДЗЗ) и невозможностью их решения с требуемым качеством на основе существующих моделей и методов управления ее функционированием в условиях ресурсной ограниченности.

Преодоление этого противоречия видится в научно обоснованном повышении уровня автоматизации процессов управления ресурсами ССОД ДЗЗ. В работах [1,2], были предложены пути достижения данного результата.

В соответствии с ними для решения поставленной задачи в данной статье предложен алгоритм формирования очереди обработки данных дистанционного зондирования Земли по критерию приоритета поступающих информационных задач, который обеспечит учет:

- с одной стороны, текущих условий развития потенциально-опасных или иных процессов мониторинга путем модификации коэффициентов относительных значимостей поступающих информационных задач,
- а с другой – степень вклада привлекаемых ресурсов обработки в интегральный результат, обеспечивая при этом требуемый уровень полноты результатов их решения.

Методы и материалы

С учетом результатов, полученных в работах [1,2], а также в соответствии с подходом, предложенным в работах [3,4], функционирование ССОД ДЗЗ представляет собой целенаправленный процесс, комплексный показатель эффективности которого может быть представлен в виде совокупности частных показателей

$$\Theta = f(P, D, T),$$

где:

Θ – комплексный показатель эффективности функционирования ССОД ДЗЗ;

P – показатель результативности функционирования ССОД ДЗЗ;

T – показатель оперативности решения информационных задач;

D – показатель ресурсоемкости, который определяет потребность в ресурсах при решении задач различных типов, которая обеспечивает требуемый уровень полноты результатов их решения.

Показатель результативности функционирования ССОД ДЗЗ определяется в соответствии с формулой

$$P = \frac{\sum (\xi_m \tilde{u}_m)}{\sum \xi_m u_m} \rightarrow 1,$$

где:

ξ_m – коэффициент относительной значимости задач m -го типа;

$\tilde{u}_m$ – количество решенных задач за отчетный период времени;

u_m – количество поступивших задач за отчетный период времени.

Показатель оперативности решения задач определяется в соответствии с формулой:

$$\Xi \in (0,1),$$

при этом:

$$\tau_m = \sum \omega_{mn} \tau_m n,$$

$$\omega_{mn} = \begin{cases} 0, & X_{mn} \leq X \\ 1, & X_{mn} > X \end{cases},$$

где:

$T_{\text{норм}}$ – нормативное время, отводимое для решения соответствующей задачи.

X_{mn} – коэффициент степени вклада n -го ресурса в интегральный результат решения m -й задачи.

Таким образом, повышение эффективности функционирования ССОД ДЗЗ в условиях ограниченности ее ресурсов и возрастания динамичности процессов мониторинга может быть достигнуто:

– с одной стороны, путем увеличения значения показателя результативности функционирования ССОД ДЗЗ. Это может быть достигнуто на основе разработки методов и алгоритмов, которые обеспечат возможность адаптации к текущим внешним условиям путем систематического уточнения значений коэффициентов относительной значимости поступающих задач, и первоочередного решения тех задач, у которых значение этого коэффициента больше;

– с другой стороны, путем повышения оперативности решения поступающих задач. Это может быть достигнуто на основе разработки и использования

методов и алгоритмов интеллектуального управления функционированием ССОД ДЗЗ, при котором учитывается вклад ресурсов обработки в интегральный результат решения задач.

В настоящей статье предложен алгоритм, обеспечивающий решение первой задачи.

В качестве исходных данных для работы предложенного алгоритма выступает очередная поступившая в ССОД ДЗЗ информационная задача. На основе имеющейся базы данных типов задач, определяется тип поступившей задачи. Далее формируется базовый (т.е. «идеальный») сценарий ее решения, при котором в решении задействуются все необходимые ресурсы в требуемой последовательности, при этом приоритет задачи не уменьшается и не увеличивается.

При работе алгоритма полагается, что для каждого типа информационных задач ведется и доступна информационно-аналитическая (экспертная) система учета базовых сценариев их решения. Далее осуществляется оптимизация относительно показателя результативности, после чего формируется сценарий задействования ресурсов ССОД ДЗЗ по решению поступившей информационной задачи.

Алгоритм включает в себя последовательное выполнение трех этапов, общая схема которых представлена на рис 1.

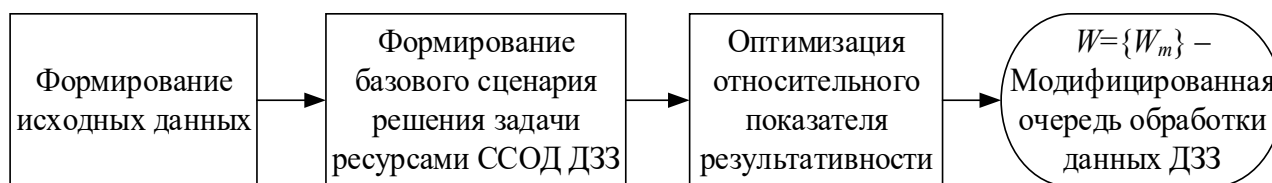


Рис. 1. Общая схема алгоритма

На первом этапе работы алгоритма (его схема представлена на рисунке 2) осуществляется получение исходных данных в виде очередной информационной задачи и параметров управления функционированием ССОД ДЗЗ.

Исходными данными для алгоритма на данном этапе являются:

- 1) P^* – требования к результативности функционирования ССОД ДЗЗ;
- 2) $Z = \{z_m\}$ – множество типов информационных задач;
- 3) $R = \{r_n\}$ – множество доступных ресурсов ССОД ДЗЗ.

В качестве настраиваемого параметра управления используется:

$\Xi \in [0,1]$ – порог повышения приоритета задач при формировании очереди обработки данных ДЗЗ.

На втором этапе алгоритма осуществляется формирование базового сценария решения очередной поступившей задачи ресурсами ССОД ДЗЗ.

Схема второго этапа метода представлена на рис 2.

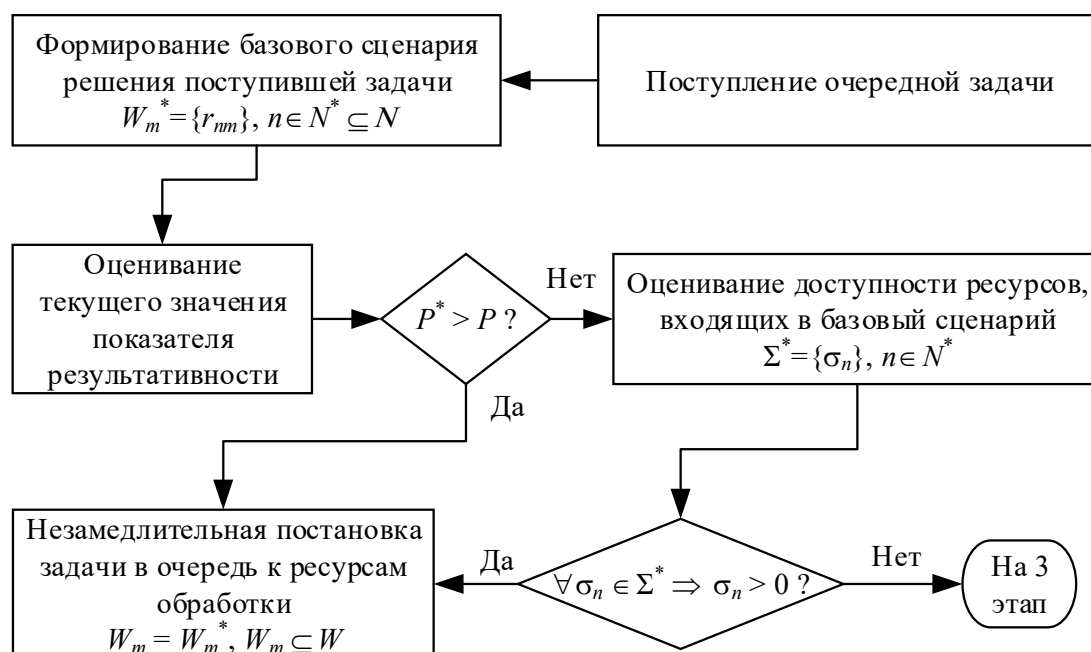


Рис. 2. Схема второго этапа метода

На первом шаге этапа на основе анализа типа поступившей задачи осуществляется поиск подходящего сценария ее решения в информационно-аналитической (экспертной) системе учета базовых сценариев решения информационных задач.

На втором шаге этапа осуществляется оценивание текущего значения показателя результативности функционирования ССОД ДЗЗ.

Если это значение меньше требуемого значения показателя P^* , то данный базовый сценарий решения задачи считается рациональным, и осуществляется незамедлительная постановка задачи в очередь к ресурсам обработки. Работа алгоритма при этом завершается.

В случае, если текущее значение показателя результативности превышает требуемое значение показателя P^* , то осуществляется переход на третий шаг этапа, на котором осуществляется оценивание доступности ресурсов, включенных в базовый сценарий обработки.

В соответствии с подходом, предложенным в работе [1], доступность ресурсов представляет собой вектор значений $\sigma = \{\sigma_n\}, N=1, N$. Таким образом, формируется вектор $\Sigma^* = \{\sigma_n\}, N \in [1, N^*]$, который включает значения доступности только тех ресурсов, которые вошли на первом шаге текущего этапа алгоритма в базовый сценарий. Если все вошедшие в базовый сценарий ресурсы доступны, то данный базовый сценарий решения задачи считается рациональным, и осуществляется незамедлительная постановка задачи в очередь к ресурсам обработки. Работа алгоритма при этом завершается.

В противном случае осуществляется переход на третий этап работы алгоритма, на котором осуществляется модификация очереди обработки данных в ССОД ДЗЗ, путем корректировки значения коэффициента относительной значимости текущей задачи и постановки ее в очередь с учетом этого значения.

Схема третьего этапа метода представлена на рис 3.



Рис. 3. Схема третьего этапа метода

На первом шаге этапа осуществляется сравнение значения коэффициента относительной значимости поступившей задачи со значением параметра $\Xi \in [0,1]$ т.е. с пороговым значением, при котором должна осуществляться процедура повышения ее приоритета относительно других задач.

Критерий при этом определяется следующим образом: $\xi(z_m) > \Xi$.

Если значение коэффициента относительной значимости задачи не больше порогового, то осуществляется постановка задачи z_m в конец очереди, и метод завершает свою работу. В противном случае осуществляется переход на второй шаг, на котором осуществляется уточнение коэффициента ее относительной значимости. При этом выполняется:

1) определение множества задач, связанных с мониторингом потенциально-опасных процессов, имеющих причинно-следственные связи с другими процес-

сами, для наблюдения за которыми также сформированы задачи, находящиеся в очереди: $Z^* = \{z_k \mid z_m \rightarrow z_k\}$.

2) Модификация значения коэффициента относительной значимости текущей задачи $x(z_m) : x(z_m) = \operatorname{argmax}(x(Z^*))$

Для выполнения данных процедур используются возможности, предложенные и описанные в работах [5,6,7].

На следующих шагах третьего этапа алгоритма осуществляется постановка задачи в очередь и ее упорядочение. При этом реализуется следующий алгоритм.

На 3–5 шагах этапа формируются 3 вектора (массива) показателей.

Первый вектор определяет относительные значимости α_m всех имеющихся в очереди задач на текущий момент времени и определяется следующей формулой:

$$A = \{\alpha_m\}, \alpha_m = \frac{\varphi(z_m)\xi(z_m)}{\sum \varphi(z_m)\xi(z_m)},$$

где φ_m определяется следующим образом:

$$\varphi = (z_m) = \begin{cases} 0, z_m \notin W_m \\ 1, z_m \in W_m \end{cases},$$

т.е:

$\varphi_m = 0$, если задача того же типа, что и z_m , отсутствует в очереди;

$\varphi_m = 1$, если присутствует.

Сумма значимостей α_m всех находящихся в очередях задач нормирована на 1.

Далее определяется вектор со значениями коэффициентов относительных значимостей всех задач $B = \{\beta_m\}$, решенных к рассматриваемому моменту времени.

$$B = \{\beta_m\}, \beta_m = \frac{\varphi(z_m)\xi(z_m)c(z_m)}{\sum \varphi(z_m)\xi(z_m)c(z_m)},$$

где $c(z_m)$ – общее количество решенных задач на текущий момент времени.

При определении β_m учитываются только типы задач, которые находятся в данный момент в очереди на входе в систему.

Наконец, определяется комбинированный вектор параметров $Y = \{\gamma_m\}$, определяемый формулой:

$$Y = \{\gamma_m\}, \gamma_m = \alpha_m + \Xi(\alpha_m - \beta_m),$$

где $\Xi \in (0,1)$ – порог повышения приоритета задачи в очереди, который в данном случае используется как коэффициент обратной связи, деформирующий совокупность α_m значимостей задач на входе с учетом уже решенных задач.

В данной формуле физический смысл параметра Ξ заключается в том, что он позволяет уменьшить количество обрабатываемых задач некоторого типа, если количество уже решенных таких задач велико, и увеличить вероятность решения более редких (или низкоприоритетных) задач.

Таким образом, обеспечивается сбалансированность потоков решаемых задач с их среднестатистическими характеристиками, но при этом гарантируется, что более важные задачи, решение которых вносит наиболее существенный вклад в конечное значение комплексного показателя результативности функционирования ССОД ДЗЗ, будут решаться в первую очередь.

Заключение

Результатом работы алгоритма является модифицированная очередь обработки данных дистанционного зондирования Земли в ССОД ДЗЗ, оптимизированная по критерию приоритета поступающих задач. Таким образом, разработанный алгоритм позволяет обоснованно повысить общую эффективность функционирования ССОД ДЗЗ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карин С.А. Операционно-временная модель функционирования систем комплексной обработки геопространственных данных в условиях дефицита их ресурсов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – №2. – С. 51-57.
2. Карин С.А., Челышов С.В. Исследование путей повышения полноты решения задач системой комплексной обработки данных дистанционного зондирования земли // Труды XXX Военно-научной конференции, проходящей 1-2 ноября 2016 года в НИИЦ (г. Курск) ФГУП «18 ЦНИИ МО РФ» / Курск: НИЦ (г. Курск) в.ч. 11135, 2016. – С.49-50.
3. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. – М.: МО СССР, 2003. – 635 с.
4. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремлённых систем. – М.: АСТ, 2006. – 504 с. – ISBN 985-13-5638-7.
5. Алферов А.В., Карин А.И., Карин С.А., Октябрьский В.В. Метод адаптивного определения приоритетов информационно-расчетных задач в системах мониторинга потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера в условиях ресурсной ограниченности // Труды Военно-космической академии. Выпуск 676. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2021. С. 95–104.
6. Карин С.А. Построение предметно-ориентированной онтологии в системах обработки пространственных данных // Информационно-управляющие системы. – 2014. – №4. – С. 78-84.
7. Карин С.А., Дудин Е.А. Опыт разработки предметно-ориентированной программной платформы ведения банка геопространственных данных в системе непрерывной подготовки военных специалистов в области ДЗЗ // Сборник трудов всероссийской ВНК «Актуальные проблемы подготовки специалистов в области сбора и обработки информации техническими средствами», часть 1. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2014. – С. 236-245.

© С. А. Карин, В. В. Лобовко, 2025

С. А. Карин^{1✉}, В. В. Лобовко¹

Разработка алгоритма формирования сценариев обработки данных дистанционного зондирования Земли на основе учета параметров текущего информационного потока

¹Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: vka@mil.ru

Аннотация. В статье предложен алгоритм управления сценариями обработки данных в системах сбора и обработки данных дистанционного зондирования Земли (ССОД ДЗЗ) в условиях их ресурсной ограниченности на основе адаптации к текущему информационному потоку. Данный алгоритм позволяет осуществлять многокритериальное поуровнево координируемое управление функционированием ССОД ДЗЗ на основе обоснованного регулирования управляющих параметров, в частности, порога повышения приоритета поступающих информационных задач, степени вклада ресурсов, а также времени ожидания доступности ресурса, что позволяет обеспечить повышение как оперативности, так и результативности ее функционирования.

Ключевые слова: комплексная обработка данных ДЗЗ, сценарии обработки, адаптация, рациональный план применения ресурсов, управление

S. A. Karin^{1✉}, V. V. Lobovko¹

Development of an algorithm for the formation of scenarios for processing remote sensing data of the Earth based on taking into account the parameters of the current information flow

¹Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russian Federation
e-mail: vka@mil.ru

Abstract. The article proposes an algorithm for managing data processing scenarios in systems for collecting and processing Earth remote sensing data (ERSDS) in conditions of their resource limitations based on adaptation to the current information flow. This algorithm allows for multi-criteria, level-coordinated control of the functioning of the remote sensing system based on reasonable regulation of control parameters, in particular, the threshold for increasing the priority of incoming information tasks, the degree of resource contribution, as well as the waiting time for resource availability, which allows for an increase in both the efficiency and effectiveness of its functioning.

Keywords: complex processing of remote sensing data, processing scenarios, adaptation, rational plan for the use of resources, management

Введение

Развитие средств регистрации изображений подстилающей поверхности с борта воздушных и космических носителей, основанных на различных физических принципах, обеспечило переход систем сбора и обработки данных дистан-

ционного зондирования Земли на качественно новый уровень, который позволяет получать значительно больше сведений об объектах наблюдения, как по качеству, так и по информативности [1,2]. С другой стороны, возрастание информационных потоков (как по объему, так и по числу отдельных пакетов) [3], числа информационных задач, которые решаются в интересах потребителей результатов обработки данных ДЗЗ различного уровня [4] обуславливает высокие требования к эффективности функционирования (ССОД ДЗЗ).

Таким образом, возникает противоречие между постоянно возрастающими требованиями к эффективности решения задач в ССОД ДЗЗ и невозможностью их решения с требуемым качеством на основе существующих моделей и методов управления ее функционированием в условиях ресурсной ограниченности.

Очевидно, что для преодоления этого противоречия необходимо повысить уровень автоматизации процессов управления ССОД ДЗЗ. Это, в свою очередь, позволит повысить эффективность ее функционирования в условиях ресурсной ограниченности и возрастания информационных потоков.

В работах [3-5] представлены элементы научно-методического аппарата ситуационно-адаптивного управления обработкой данных ДЗЗ в условиях ресурсной ограниченности. В частности, показано, что комплексная обработка данных ДЗЗ включает в свой состав несколько этапов, начиная с формирования заявок на разработку отчетных информационных документов, и заканчивая выдачей потребителям результатов. Каждый ресурс обработки при этом обеспечивает выполнение одной операции (подзадачи) в рамках этапа, затрачивая при этом некоторое время. Полагается, что в один момент времени отдельный ресурс может осуществлять решение только одной подзадачи. Исходя из того, как, когда и какую информацию он предоставляет в качестве результата решения своей подзадачи, определяется степень его вклада в получение интегрального результата решения информационной задачи в целом.

Также в работе [4] показано, что повышение эффективности функционирования ССОД ДЗЗ возможно за счет обоснованного перераспределения ресурсов по решаемым информационным задачам в зависимости от поступающих информационных потоков.

Представленный в настоящей статье алгоритм позволяет формировать сценарии обработки данных ДЗЗ в ССОД ДЗЗ.

Методы и материалы

Предлагаемый алгоритм осуществляет формирование сценария обработки данных ДЗЗ на основе адаптации к текущему информационному потоку путем последовательного прохождения пяти уровней, общая схема которых представлена на рис. 1.

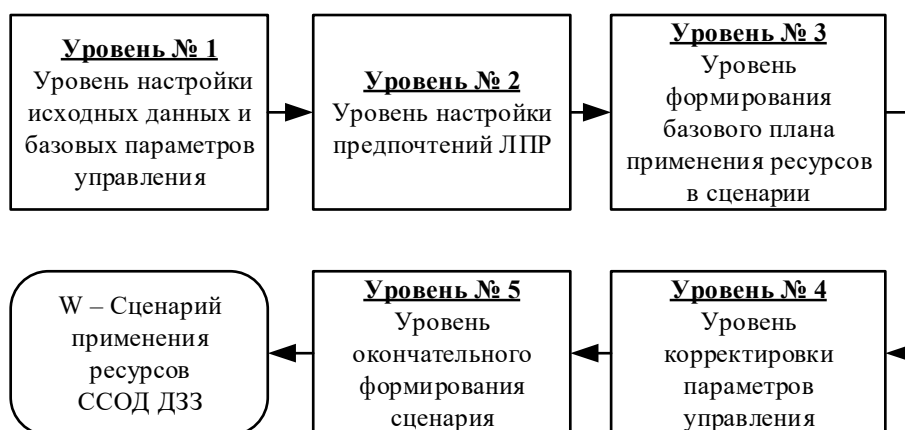


Рис. 1. Общая схема алгоритма

На первом уровне выполняется настройка исходных данных и базовых параметров управления, значения которых не должны быть превышены в процессе работы данного алгоритма.

Рассмотрим следующие исходные данные (параметры), поступающие на вход алгоритма:

- 1) P^* – требования к результативности функционирования ССОД ДЗЗ;
- 2) $Z = \{Z_m\}$ – множество типов информационных задач, для решения которых формируются сценарии обработки данных;
- 3) $R = \{r_n\}$ – множество доступных ресурсов обработки;

В качестве базовых параметров управления формирование сценариев обработки данных используются:

X_{min}^* – граничное значение минимального вклада ресурса в интегральный результат решения задачи;

T_{max}^* – граничное значение максимального времени ожидания доступности ресурса; в случае, если требуется ожидать доступность ресурса в любых условиях, указывается значение -1;

Ξ_{min}^* – граничное значение порога повышения приоритета информационной задачи.

На втором уровне осуществляется настройка своих предпочтений лицом, принимающим решения (ЛПП), по окончательному формированию сценария обработки данных, т.е. задаются требования к показателям результативности и оперативности, а также задаются исходные значения параметров управления.

В частности, задаются исходные значения следующих параметров управления:

- 1) $X_{min} \in [0, X_{min}^*]$ – исходное значение минимального вклада ресурса в интегральный результат решения соответствующей информационной задачи;
- 2) $\Xi_{min} \in [0, \Xi_{min}^*]$ – исходное значение порога повышения приоритета информационной задачи в очереди задачи на обработку;
- 3) $T_{max} \in [0, T_{max}^*]$ – исходное значение максимального времени ожидания доступности ресурса, требуемого для решения информационной задачи. В случае, если требуется ожидать доступность ресурса всегда, указывается значение – 1.

Важным условием является то, что действия, осуществляемые на данном уровне, должны быть скоординированы с результатами работы предыдущего уровня, т.е. исходные значения параметров управления не должны выходить за пределы соответствующих граничных значений, задаваемых на первом уровне метода.

На третьем уровне осуществляется формирование базового плана применения ресурсов в сценарии решения информационной задачи, при этом, если все ресурсы, попавшие в план, свободны, то в качестве результирующего принимается именно базовый план. Схема уровня представлена на рис. 2.

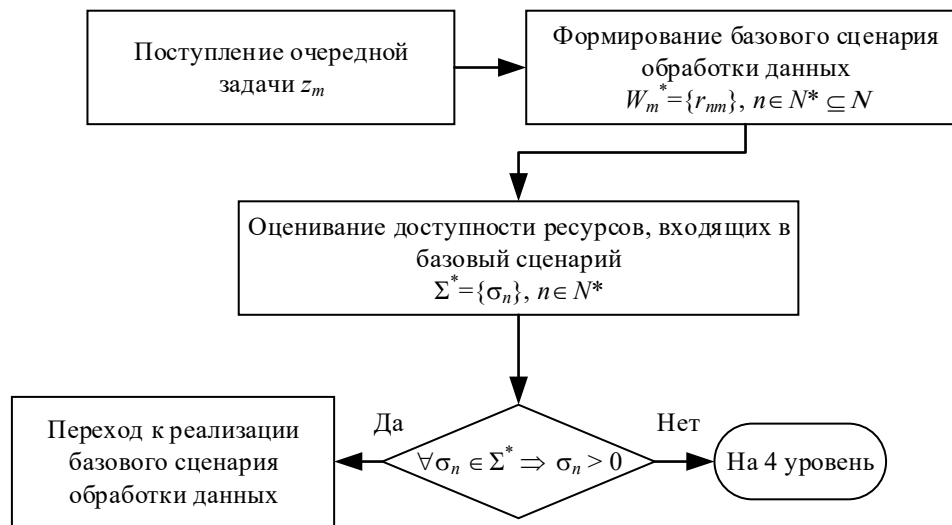


Рис. 2. Схема уровня формирования базового сценария обработки данных при решении очередной поступившей информационной задачи

На четвертом уровне осуществляется сравнение текущих значений показателей результативности и оперативности с требуемыми и в случае несоответствия выполняется корректировка параметров управления. Схема четвертого уровня метода представлена на рис. 3.

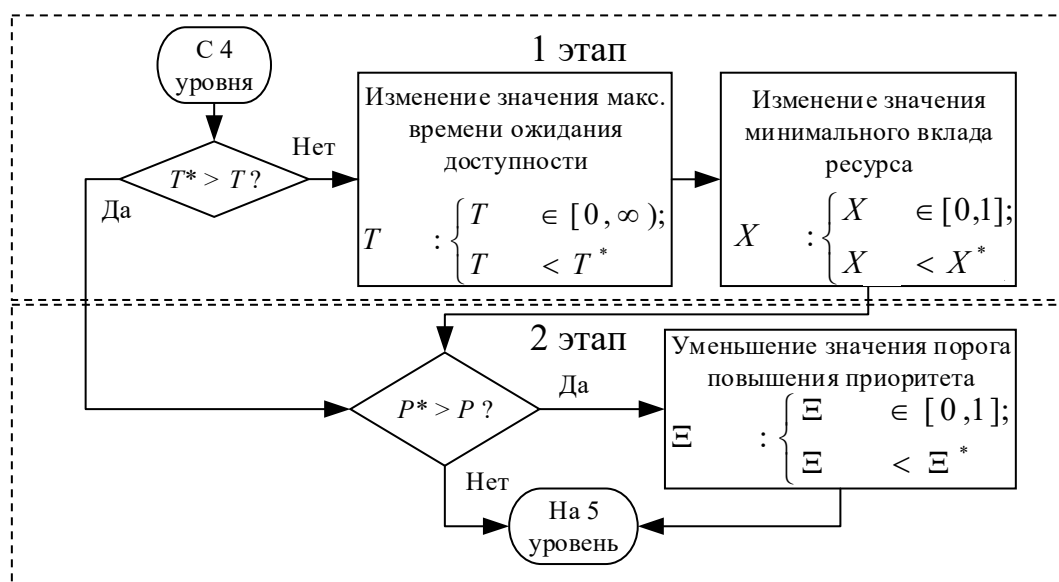


Рис. 3. Схема уровня корректировки параметров управления сценариями обработки данных при решении информационных задач

На первом этапе уровня производится сравнение текущего значения показателя оперативности решения информационных задач с минимально требуемым.

Если текущее значение меньше требуемого, то осуществляется процедура корректировки параметра, определяющего максимально допустимое время ожидания доступности привлекаемого ресурса.

Корректировка осуществляется в соответствии с формулой

$$T_{max} : \begin{cases} T_{max} \in [0; \infty); \\ T_{max} < T_{max}^* \end{cases}$$

Далее осуществляется процедура корректировки параметра, определяющего значение минимального вклада ресурса в интегральный результат решения информационной задачи. При этом используется формула

$$X_{min} : \begin{cases} X_{min} \in [0;1]; \\ X_{min} < X_{min}^* \end{cases}$$

На втором этапе уровня производится сравнение текущего значения показателя результативности функционирования ССОД ДЗЗ с минимально требуемым.

Если текущее значение меньше требуемого, то осуществляется процедура корректировки параметра, определяющего значение порога повышения приоритета очередной информационной задачи в очереди задач на обработку. При этом используется формула

$$\Xi_{min} : \begin{cases} \Xi_{min} \in [0;1]; \\ \Xi_{mix} < \Xi_{min}^* \end{cases}$$

Величина шага изменения параметров задается экспертом, отвечающим за работу данного алгоритма. Кроме того, данный эксперт отвечает за принятие решения о том, стоит ли вообще осуществлять то или иное изменение.

На пятом уровне в зависимости от текущих значений параметров управления осуществляется окончательное формирование сценария обработки данных. Схема пятого уровня метода представлена на рис. 4.

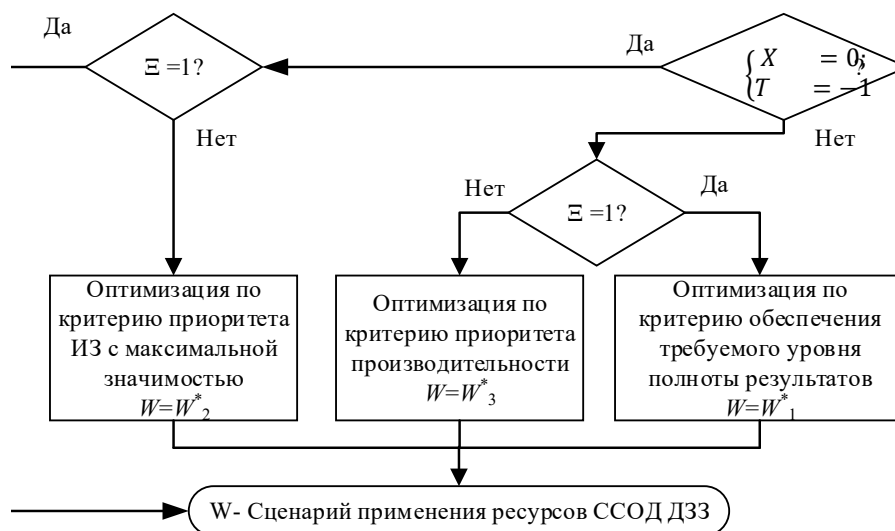


Рис. 4. Схема уровня окончательного формирования сценария обработки данных при решении информационной задачи

На данном уровне реализуется следующий частный алгоритм.

На первом его шаге анализируются значения параметров управления, определяющих значение минимального вклада ресурса в интегральный результат решения задачи, а также максимально допустимого времени ожидания доступности требуемого ресурса.

Если они соответствуют выражению в формуле (1), то это означает, что показатель оперативности находится в допустимых пределах и осуществлять оптимизацию относительно него не требуется.

$$\begin{cases} X_{min} = 0; \\ T_{max} = -1 \end{cases} \quad (1)$$

В этом случае осуществляется переход на второй шаг частного алгоритма, на котором анализируется текущее значение параметра, определяющего значение порога повышения приоритета очередной задачи в очереди на обработку.

Если это значение равно единице, это означает, что показатель результативности функционирования ССОД ДЗЗ находится в допустимых пределах и осуществлять оптимизацию не требуется. В этом случае базовый план решения очередной информационной задачи считается окончательным и осуществляется переход к его исполнению. В противном случае, происходит переход на третий шаг частного алгоритма, на котором осуществляется оптимизация по критерию приоритета информационных задач с максимальной значимостью [6,7].

Если значения параметров управления, которые были определены на первом шаге частного алгоритма и которые определяют значение минимального вклада ресурса в интегральный результат решения задачи, а также максимально допустимого времени ожидания доступности требуемого ресурса, таковы, что нарушается условие в формуле (1), то осуществляется переход на четвертый шаг частного алгоритма.

На этом шаге, в зависимости от текущего значения параметра, определяющего значение порога повышения приоритета очередной задачи, принимается решение о выборе метода оптимизации.

Так, если значение этого параметра равно единице, то осуществляется оптимизация по критерию обеспечения требуемого уровня полноты результатов решения задач, в противном случае – осуществляется оптимизация по критерию приоритета производительности [6,7].

Заключение

Таким образом, представленный в данной статье алгоритм осуществляет адаптацию процессов комплексной обработки данных в ССОД ДЗЗ к текущим информационным потокам, при этом обеспечивается:

- с одной стороны, адаптация к текущим ресурсным возможностям ССОД ДЗЗ (ресурсной ограниченности) путем постоянного мониторинга значений параметров управления ее функционированием, которые определяют значения минимального вклада ресурса в интегральный результат решения той или иной информационной задачи, а также максимально допустимого времени ожидания доступности требуемого ресурса;

- а с другой – учет относительной значимости информационных задач, т.е. возможность повышения приоритета той или иной поступившей задачи в зависимости от текущих информационных потоков.

В результате работы данного алгоритма будет сформирован сценарий обработки данных, который будет наилучшим образом применим в текущих условиях (выбран оптимальный, исходя из текущих информационных потоков и ресурсным возможностям ССОД ДЗЗ).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Н. Н. Севастьянов, В. Н. Бранец, В. А. Панченко, Н. В. Казинский, Т. В. Кондранин, С. С. Негодяев. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли. – ТРУДЫ МФТИ. – 2009. – Том 1, №3. – С.14–22.
2. Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, В. П. Ходненко. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов. – Вопросы электромеханики. – 2010. – Т. 114. – С.15–26.

3. Алферов А.В., Карин А.И., Карин С.А., Октябрьский В.В. Метод адаптивного определения приоритетов информационно-расчетных задач в системах мониторинга потенциально-опасных процессов природного и техногенного характера в условиях ресурсной ограниченности // Труды Военно-космической академии. Выпуск 676. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2021. С. 95–104.

4. Карин А.И., Карин С.А., Октябрьский В.В. Модели адаптивного управления функционированием систем комплексной обработки геопространственных данных при решении задач мониторинга территориально-распределенных объектов // Труды Военно-космической академии. Выпуск 671. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – С. 314-325.

5. С. А. Карин. Интеграция в едином информационном пространстве разнородных геопространственных данных // Информационно-управляющие системы. 2012. № 2. С. 89–94.

6. Бережной И.В., Карин А.И., Карин С.А. Алгоритмы комплексной обработки геоинформации в системах специального назначения // Труды Военно-космической академии. Выпуск 660. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – С. 73-78.

7. Карин С.А., Карин А.И. Способ повышения эффективности комплексной обработки данных дистанционного зондирования Земли при решении задач мониторинга пространственных объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 4. С. 691–698. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-691-698

© С. А. Карин, В. В. Лобовко, 2025

А. Н. Мазяр¹, Е. А. Мамаш², И. А. Пестунов^{1,2}✉

Многолетний анализ температуры поверхностного слоя озера Байкал по данным спутникового мониторинга

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

Аннотация. Температура поверхностного слоя (ТПС) – ключевой параметр при изучении гидрологического режима и экологического состояния водоёмов. Традиционные методы её измерения (судовые и стационарные наблюдения) имеют ряд ограничений, включая точечный характер данных, что затрудняет их использование для мониторинга динамичных крупных озёрных систем, таких как озеро Байкал. Целью данной работы являлась валидация температурных продуктов, использующих данные спутников Landsat, Aqua, Terra, и анализ многолетней динамики ТПС Байкала за период 1990–2024 гг. в контексте известных климатических сценариев. Результаты валидации показали, что алгоритм на основе данных Landsat обеспечивает более высокую точность оценки ТПС по сравнению с аналогичными продуктами: коэффициент детерминации для него составил 0.93, тогда как для других продуктов от 0.85 до 0.91. Анализ многолетней динамики выявил устойчивую тенденцию к потеплению ТПС Байкала со скоростью 0.049 °C/год, что соответствует пессимистичным климатическим сценариям.

Ключевые слова: озеро Байкал, температура поверхностного слоя, Landsat, MODIS, валидация, сценарии антропогенного воздействия

A. N. Maziar¹, E. A. Mamash², I. A. Pestunov^{1,2}✉

Multiyear analysis of lake Baikal surface layer temperature based on satellite monitoring data

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

Abstract. Skin surface temperature (SST) is a key parameter in studying the hydrological regime and ecological state of water bodies. Traditional methods of its measurement (ship and stationary observations) have a number of limitations, including the point nature of the data, which makes it difficult to use them for monitoring dynamic large lake systems, such as Lake Baikal. The aim of this work was to validate temperature products using data from Landsat, Aqua, and Terra satellites and to analyze the multi-year dynamics of Baikal SST for the period 1990-2024 in the context of known climate scenarios. The validation results showed that the algorithm based on Landsat data provides higher accuracy of SST estimation compared to analogs: its coefficient of determination was 0.93, while for other products it was 0.85-0.91. The analysis of long-term dynamics revealed a steady tendency for the Baikal SST warming at a rate of 0.049 °C/year, which corresponds to pessimistic climate scenarios.

Keywords: lake Baikal, skin surface temperature, Landsat, MODIS, validation, anthropogenic impact scenarios

Введение

Температура поверхностного слоя (ТПС) – ключевой параметр водных объектов, влияющий на содержание хлорофилла, мутность, испарение и другие процессы [1]. Ее динамика служит важным индикатором климатических изменений [2]. Озеро Байкал, благодаря своей глубине и высокой теплоемкости, аккумулирует тепло в долгосрочной перспективе, что делает его особенно ценным для изучения климатических колебаний.

Традиционные методы измерения температуры (*in situ*) обладают ограниченной применимостью из-за точечного характера данных, что затрудняет оперативный мониторинг всего водоема. В отличие от них, спутниковое дистанционное зондирование обеспечивает пространственно-временную информацию по всей акватории, что особенно важно для крупных объектов, таких как Байкал.

Наибольшее применение при оценке температуры поверхностного слоя (ТПС) озер находят продукты, использующие данные спутников Landsat, Terra и Aqua. Многолетние временные ряды этих данных позволяют выявлять статистически значимые тренды изменения ТПС, определять основные закономерности термического режима и проводить количественную оценку наблюдаемых изменений за последние десятилетия [3, 4].

Первая попытка оценки температуры поверхностного слоя (ТПС) озера Байкал по спутниковым данным AVHRR/NOAA была осуществлена в 1995 году [5].

В исследованиях Е.Н. Сутириной [6, 7] на основе данных AVHRR/NOAA была проанализирована внутригодовая и межгодовая динамика пространственного распределения температуры поверхности озера.

Для анализа динамики ТПС озера Байкал в данной работе использовались многомодельные ансамбли CMIP5 и CMIP6 [8, 9]. Прогнозные расчеты для XXI века выполнялись по сценариям RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 для CMIP5, а также SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 для CMIP6.

Сценарии RCP8.5 и SSP5-8.5 предполагают максимальное радиационное воздействие, обусловленное неконтролируемым ростом промышленности и населения при отсутствии мер по снижению выбросов парниковых газов. В отличие от них, сценарии RCP2.6 и SSP1-2.6 соответствуют активной климатической политике, направленной на достижение нулевых выбросов к 2100 году. Сценарии RCP4.5 и SSP2-4.5 занимают промежуточное положение, учитывая естественное ограничение доступности ископаемых ресурсов.

В рамках исследования проведена валидация температурных продуктов, основанных на данных спутников Landsat и MODIS. На основе этих данных рассчитаны среднегодовые значения ТПС озера Байкал за период 1990-2024 гг., а их динамика сопоставлена с прогнозными значениями климатических моделей из мультимодельных ансамблей CMIP5 и CMIP6, полученных для различных сценариев антропогенного воздействия.

Методы и материалы

Для валидации спутниковых температурных продуктов использовались судовые измерения, предоставленные Лимнологическим институтом СО РАН, за

период 2021-2024 гг. Валидация проводилась по данным дистанционного зондирования Земли со спутников Landsat-8, -9, Terra и Aqua за те же 2021-2024 гг. Для расчета среднегодовых значений ТПС озера Байкал и анализа их динамики применялись наборы данных: Landsat-5, -7, -8, -9 за 1990-2024 гг., а также Terra и Aqua за 2001-2024 гг.

Данные спектрорадиометра MODIS позволяют оценить температуру поверхностного слоя крупных водных объектов благодаря пространственному разрешению около 1000 м. В то же время, тепловые каналы спутников Landsat с разрешением приблизительно 100 м подходят в том числе для анализа температуры небольших водоёмов и прибрежных зон.

В данной работе доступ к спутниковым данным и их обработка осуществлялись через облачную платформу Google Earth Engine (GEE), которая в последние годы получает широкое распространение. Данная платформа предоставляет не только доступ к информации, но и инструменты для обработки больших временных рядов.

В исследовании использовались готовые температурные продукты MODIS LST: MOD11A1, MYD11A1, MOD21C1 и MYD21C1. Эти продукты представляют ряды дневных и ночных данных со спутников Terra и Aqua, которые ввиду различий между собой рассматривались отдельно.

В работе [10], выполненной S. Ermida и соавторами, был разработан алгоритм LST_erm для расчета температуры поверхностного слоя (ТПС) в среде GEE применительно к данным спутников серии Landsat, начиная с Landsat-4. При реализации алгоритма водные поверхности идентифицируются с помощью битовых масок, причем коэффициент эмиссии для водных объектов принимается постоянным и равным 0.99.

Следует, однако, отметить существенный недостаток данного подхода – необходимость использования данных ASTER GED, которые характеризуются неполным покрытием территории Российской Федерации. В частности, акватория озера Байкал имеет значительные пробелы в покрытии этими данными.

В работе [11] была предложена модифицированная версия алгоритма LST_erm, обозначенная как LST_sob, которая не зависит от покрытия ASTER GED. Основное отличие модифицированного алгоритма заключается в измененном подходе к расчету коэффициента эмиссии голой почвы. В оригинальной версии алгоритма этот параметр рассчитывался на основе базы данных ASTER GED, тогда как в модификации, разработанной в ФИЦ ИВТ, он принимается постоянным и равным 0.97.

Для исследования температурного тренда поверхностного слоя озера Байкал использовались среднегодовые значения температуры, полученные путем пространственного интегрирования по всей акватории озера и временного усреднения за период с июня по октябрь. Выбор этого временного интервала (период открытой воды) обусловлен ухудшением качества спутниковых данных в остальные месяцы, вызванным процессами ледостава, неблагоприятными метеорологическими условиями и повышенной облачностью. Анализ выполнен для временного ряда с 1990 по 2025 год.

Методика определения температурного тренда основана на линейной регрессии, что соответствует подходу, применённому в глобальном исследовании динамики температуры поверхностных вод с использованием продуктов MODIS LST [4]. В данной работе для построения регрессионной модели использовалась оценка Тейла-Сена.

В работе использовался преимущественно один член ансамбля экспериментов (r1i1p1f1) для каждой модели, поскольку количество доступных ансамблей варьировалось для разных моделей и сценариев. Все модельные данные были интерполированы на регулярную широтно-долготную сетку $1^\circ \times 1^\circ$ с применением метода билинейной интерполяции. Для оценки ТПС по прогнозам климатических моделей вычислялось среднее значение по обширной выборке доступных моделей. Всего в анализ включено 56 моделей (29 из ансамбля CMIP5 и 27 из ансамбля CMIP6).

Предварительная обработка данных, визуализация и сравнение результатов климатических моделей со спутниковыми данными выполнялись с использованием Earth System Model Evaluation Tool (ESMValTool) версии 2.0. Этот инструмент специально разработан для упрощения комплексной оценки и анализа моделей CMIP-ансамблей.

Результаты и обсуждения

Результаты валидации температурных продуктов включают расчет следующих статистических показателей: среднего сдвига (Bias), среднеквадратической ошибки (RMSE) и коэффициента детерминации (R^2). Хотя все рассмотренные продукты демонстрируют сопоставимые значения этих показателей, алгоритм LST_sob характеризуется наименьшими абсолютными значениями Bias и RMSE, а также наибольшим значением R^2 (табл. 1).

Все статистические характеристики были рассчитаны после исключения выбросов с использованием фильтра Хампеля – надежного метода обнаружения аномальных значений [12].

Таблица 1

Результаты валидации спутниковых температурных продуктов

Продукт	Bias	RMSE	R^2	N
MO(Y)D11A1 (день)	-0.52	1.52	0.91	183
MO(Y)D11A1 (ночь)	-0.81	1.47	0.91	183
MO(Y)D21C1 (день)	0.44	1.83	0.86	199
MO(Y)D21C1 (ночь)	-0.43	1.78	0.85	137
LST sob	-0.25	1.34	0.93	20

На рис. 1 представлены соответствующие диаграммы рассеяния и уравнения регрессий.

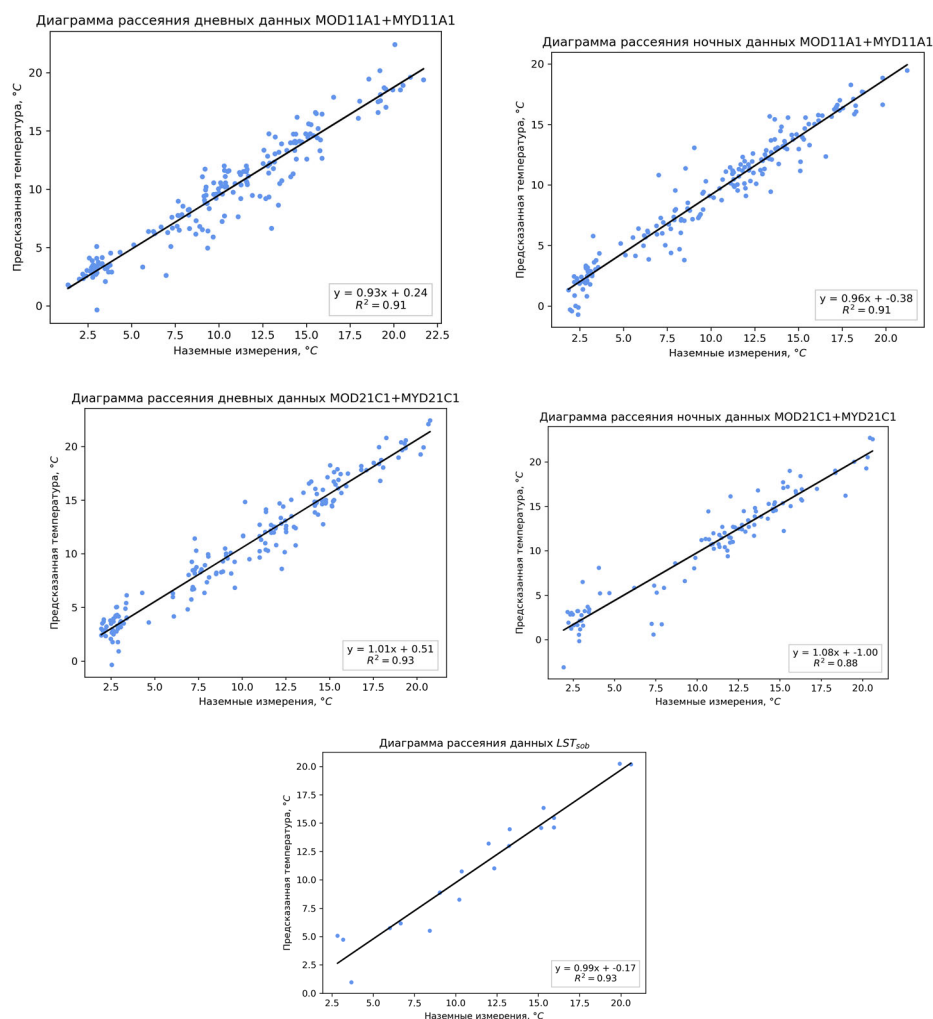


Рис. 1. Диаграммы рассеяния, уравнения регрессии и значения коэффициента детерминации на данных валидации для продуктов MODIS LST и LST_sob

Анализ среднегодовых трендов температуры поверхностного слоя озера Байкал, полученных по данным климатического моделирования, показывает высокую согласованность результатов внутри каждого многомодельного ансамбля (рис. 2). Для ансамбля CMIP5 расчетные значения составили: 0.0387 °C/год (RCP2.6), 0.0416 °C/год (RCP4.5) и 0.0408 °C/год (RCP8.5). В случае CMIP6 наблюдаются более высокие темпы потепления: 0.0545 °C/год (SSP1-2.6), 0.0591 °C/год (SSP2-4.5) и 0.0577 °C/год (SSP5-8.5).

Такая схожесть результатов внутри ансамблей объясняется относительно коротким периодом моделирования. В исторических экспериментах параметры выбросов парниковых газов, идентичные для всех сценариев, основаны на фактических данных. Различия между сценариями начинают проявляться только с 2005 года для CMIP5 и с 2015 года для CMIP6. За столь краткие периоды (20 и 10 лет соответственно) специфические параметры сценариев не успевают существенно повлиять на результаты моделирования.

Тренд ТПС, рассчитанный по спутниковым данным Landsat с использованием алгоритма LST_sob ($0.0468\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$), занимает промежуточное положение между значениями CMIP5 и CMIP6. Учитывая более продолжительный период моделирования в CMIP5, именно эти данные были использованы для сопоставления со спутниковыми наблюдениями. Результаты свидетельствуют, что наблюдаемый тренд температуры озера Байкал в большей степени соответствует пессимистичным климатическим сценариям.

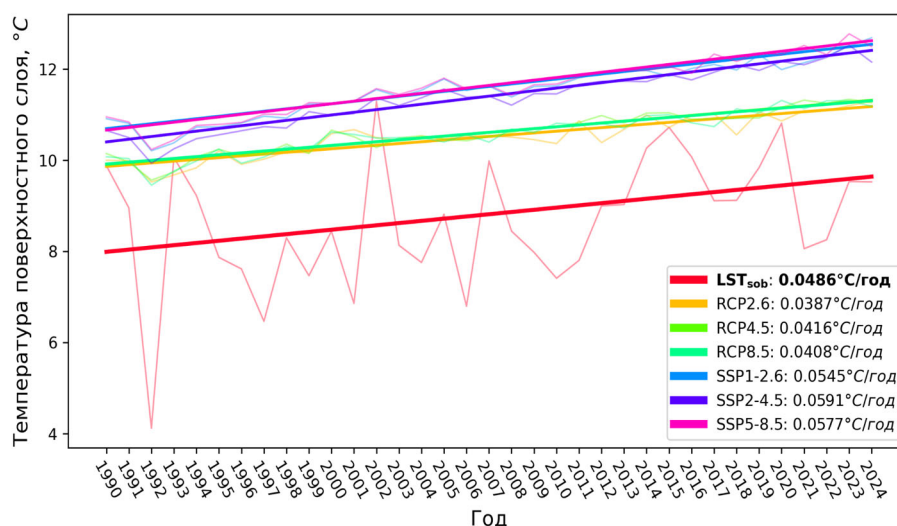


Рис. 2. Динамика среднемесячных значений ТПС для акватории озера Байкал по данным спутников Landsat-5, -7, -8, -9, и прогнозы ансамблей климатических моделей

Заключение

Разработанная методика валидации спутниковых данных, основанная на использовании судовых измерений и облачной платформы GEE, подтвердила эффективность рассматриваемых спутниковых продуктов для мониторинга температурного режима озера Байкал. Полученные значения среднеквадратической ошибки находятся в диапазоне 1.34–1.83, а коэффициента детерминации варьируют от 0.85 до 0.93.

Исследование динамики температуры поверхностного слоя озера Байкал, выполненное на основе спутниковых данных и климатического моделирования, выявило устойчивый положительный тренд ($0.0468\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Сравнение с результатами модельных расчетов CMIP5 и CMIP6 продемонстрировало соответствие наблюдаемых изменений температуры наиболее интенсивным сценариям антропогенного воздействия (RCP8.5/SSP5-8.5), превышающим прогнозы для умеренных вариантов развития.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Россолимо Л.Л. Температурный режим озера Байкал // Тр. байк. лимнол. ст. ВСФ АН СССР. 1957. Т. XVI. – 552 с.

2. Donlon C. et al. Successes and challenges for the modern sea surface temperature observing system. Community // White Paper for Ocean Obs. 2009. Vol. 9. P. 1–9.
3. Liu G., Ou W., Zhang Y. et al. Validating and mapping surface water temperatures in Lake Taihu: Results from MODIS land surface temperature products // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. Vol. 8, № 3. P. 1230–1244.
4. Sobrino J. A., García-Monteiro S., Julien Y. An analysis of the Lake Surface Water Temperature evolution of the world's largest lakes during the years 2003-2020 using MODIS data // Recent Advances in Remote Sensing. 2024. Vol. 1. P. 1–9.
5. Bolgrien D. W., Granin N. G., Levin L. Surface Temperature Dynamics of Lake Baikal Observed from AVHRR Images // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1995. Vol. 61, № 2. P. 211–216.
6. Сутырина Е. Н. Использование данных дистанционного спутникового зондирования для картографического отображения и анализа распределения температуры поверхности воды озера Байкал // Известия Ирк. гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. 2012. Т. 5, № 2. С. 240–251.
7. Сутырина Е.Н. Применение интерполяции для заполнения пробелов в рядах спутниковых наблюдений за температурным режимом озера Байкал // В сборнике: Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы VII Междунар. науч. конф., СФУ, ИКИТ. 2020. С. 293–296.
8. Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design // Bulletin of the American Meteorological Society. 2012. Vol. 93. P. 485–498.
9. Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geoscientific Model Development. 2016. Vol. 9. P. 1937–1958.
10. Ermida S., Soares P., Mantas V., Göttsche F.-M., Trigo I. Google Earth Engine open-source code for land surface temperature estimation from the Landsat series // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, № 9. P. 1471.
11. Мамаш Е. А., Пестунов И. А., Кудряшова С. Я., Чумбаев А. С. Валидация значений температуры земной поверхности, вычисляемых по данным радиометра TIRS/Landsat-8, и их использование для анализа температурного режима орошаемых и посторошаемых почв Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. №. 1. С. 9–25.
12. Davies P., Gather U. The identification of multiple outliers // J. of the American Statistical Association. 1993. Vol. 88, № 423. P. 782–792.

© А. Н. Мазяр, Е. А. Мамаш, И. А. Пестунов, 2025

И. В. Овсянников^{1,2}, С. А. Рылов²✉

Использование камер наружного видеонаблюдения для мониторинга осадков

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: RylovS@mail.ru

Аннотация. Важной научно-практической задачей в области метеорологии и компьютерного зрения является разработка систем мониторинга атмосферных осадков в реальном времени. Такие системы необходимы для повышения точности краткосрочных прогнозов погоды и минимизации экономических рисков в транспортном секторе и сельском хозяйстве. В представленном исследовании разработан метод автоматической детекции осадков на основе анализа видеопотока с камер наружного наблюдения. Для обучения моделей создана специализированная методика формирования датасета, включающая синхронизацию видеок кадров с актуальными метеоданными через API метеорологических служб. В работе проведен сравнительный анализ традиционных алгоритмов машинного обучения и современных архитектур сверточных нейронных сетей. Экспериментальные результаты демонстрируют существенное превосходство методов глубокого обучения в точности классификации атмосферных осадков по сравнению с классическими подходами.

Ключевые слова: распознавание образов, детекция осадков, классификация изображений, камеры наблюдения, глубокое обучение, компьютерное зрение, прогноз погоды

I. V. Ovsyannikov^{1,2}, S. A. Rylov²✉

Using outdoor CCTV cameras for rainfall monitoring

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: RylovS@mail.ru

Abstract. An important scientific and practical challenge in meteorology and computer vision is the development of real-time rainfall monitoring systems. Such systems are crucial for improving short-term weather forecasts and economic risks in transportation and agriculture minimization. This study presents a method for automatic rainfall detection based on the analysis of video streams from surveillance cameras. A specialized dataset labeling methodology was developed for model training, involving synchronization of video frames with current weather data through meteorological service APIs. The work provides a comparative analysis of traditional machine learning algorithms and modern convolutional neural network architectures. Experimental results demonstrate the significant superiority of deep learning methods in atmospheric precipitation classification accuracy compared to classical approaches.

Keywords: pattern recognition, rain detection, image classification, outdoor surveillance cameras, CCTV, deep learning, computer vision, weather forecasting

Введение

Актуальность разработки автоматизированных систем мониторинга атмосферных осадков на основе анализа видеопотоков камер наружного наблюдения обусловлена растущими требованиями к точности метеорологических прогнозов и необходимостью минимизации экономических рисков в транспортной и сельскохозяйственных отраслях. Несмотря на существование традиционных методов измерения осадков с помощью метеорологических станций, их ограниченное пространственное покрытие и высокая стоимость обслуживания стимулируют поиск альтернативных решений [1]. В последние годы наблюдается значительный прогресс в области компьютерного зрения и глубокого обучения, что открывает новые возможности для анализа видеоданных с камер наружного наблюдения в реальном времени [2].

Анализ литературных источников показывает, что существующие методы классификации погодных условий на изображениях можно условно разделить на две группы: классические алгоритмы, основанные на анализе низкоуровневых признаков [3], и современные подходы на основе глубоких нейронных сетей [4-5]. Так, в работе [6] на датасете AAU VIRADA, содержащем 215 часов видеозаписей с камер наблюдения, сравниваются результаты распознавания дождя, полученные классическим методом на основе алгоритма Боссу и 3D CNN-моделью. Результаты показывают, что нейросетевая модель значительно превосходит метод Боссу, достигая точности 98% на тренировочных данных, тогда как метод Боссу показал точность всего около 50%. Однако большинство существующих исследований ограничивается анализом статических изображений высокого качества, в то время как обработка видеопотоков с уличных камер, характеризующихся низким разрешением и наличием артефактов компрессии, остается малоизученной областью.

Целью данной работы является разработка системы автоматической детекции атмосферных осадков на основе анализа видеопотоков с камер наружного наблюдения. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: разработка методики формирования и аннотирования датасета видеок кадров с привязкой к актуальным метеорологическим данным, сравнительный анализ эффективности классических методов машинного обучения и современных архитектур сверточных нейронных сетей, реализация веб-интерфейса для визуализации результатов работы системы в реальном времени.

Методы и материалы

Для формирования обучающей выборки был разработан специализированный Python-скрипт, осуществляющий автоматический сбор видеоданных через протокол HLS (HTTP Live Streaming) из открытых источников. Система в автоматическом режиме извлекает кадры с заданной периодичностью и связывает их с актуальными метеорологическими показателями через API сервисов по прогнозу погоды. Для обеспечения репрезентативности данных реализован механизм временной синхронизации, учитывающий задержку передачи видеопотока

и погодных измерений, сохраняя кадры только в определённый момент времени. Полученные изображения проходят этап предварительной обработки, включающий нормализацию разрешения, коррекцию цветовых характеристик и устранение артефактов сжатия.

Сравнительный анализ методов классификации проводился на двух группах алгоритмов. В качестве классического подхода использовался метод HOG (Histogram of Oriented Gradients), который успешно применяется в задачах обнаружения и классификации по визуальным признакам [7]. Метод HOG позволяет выделять локальные особенности изображения путем анализа распределения направлений градиентов яркости в отдельных областях кадра, что полезно для обнаружения дождевых полос, снежинок и т.д. Результат применения такого метода представлен на рис. 1. Вычисленные дескрипторы HOG подавались на вход логистической регрессии и алгоритма градиентного бустинга, что позволило достичь значения F1-меры на уровне 0.74, подтверждая применимость таких методов для решения поставленной задачи. Однако ограничения классических подходов, связанные с необходимостью ручного конструирования признаков и их низкой адаптивностью к изменяющимся условиям съемки, обусловили переход к современным архитектурам глубокого обучения.

Следует отметить, что полученные результаты для традиционных методов согласуются с данными других исследований в области анализа видеопотоков с камер наблюдения [8]. В частности, аналогичные ограничения по точности классификации наблюдаются при использовании методов, основанных на ручном выделении признаков.

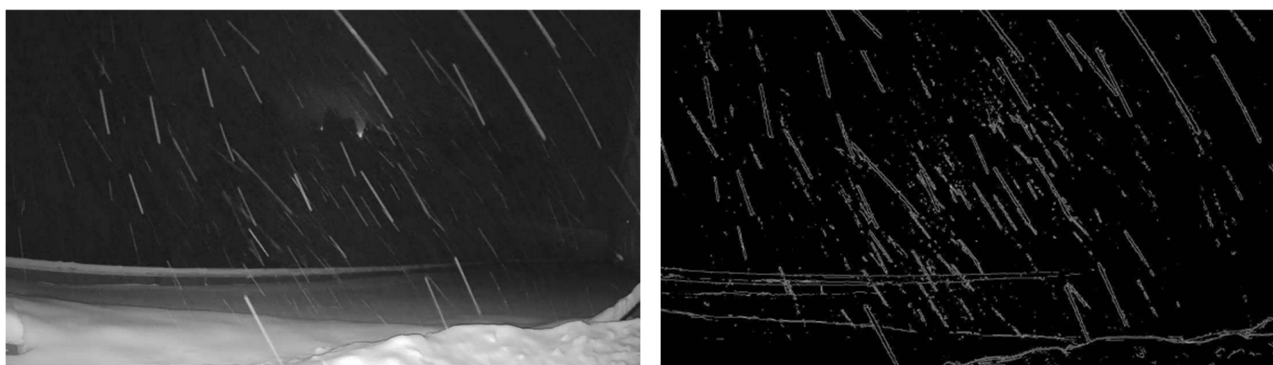


Рис. 1. Исходные данные: слева – изображение до применения HOG, справа – выделенные границы с помощью метода HOG

Для глубокого обучения была выбрана сверточная нейронная сеть EfficientNet, демонстрирующая «state-of-the-art» результаты в задачах классификации изображений при оптимальном соотношении вычислительных затрат и точности [9]. Модель показала существенное улучшение качества классификации по сравнению с традиционными методами, что подтверждается экспериментальными данными, представленными в табл. 1. Важным аспектом реализации стало применение специальных техник аугментации данных, учитывающих ха-

рактерные искажения в видеопотоках уличных камер, а также использование взвешенной функции потерь для компенсации дисбаланса классов в обучающей выборке.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов классификации

Название способа	Метрики классификации		
	Recall	Precision	F1
HOG LR	0.72	0.71	0.71
HOG GBDT	0.75	0.75	0.74
EfficientNet	0.85	0.83	0.84

Разработанный нами веб-интерфейс [10] представляет собой интерактивную карту, отображающую пространственное распределение подключенных камер видеонаблюдения (рис. 2). На карте в виде меток отмечены все доступные источники видеопотоков, интегрированные в систему. При взаимодействии с конкретной меткой пользователю становится доступен комплекс информации, включающий базовые параметры камеры (географические координаты, идентификатор и название), ссылку для прямого доступа к видеопотоку, последний обработанный системой кадр с указанием времени съемки, результаты работы классификационной модели с указанием типа осадков и уровня уверенности предсказания, а также актуальные данные из внешнего метеорологического сервиса для сравнительного анализа.

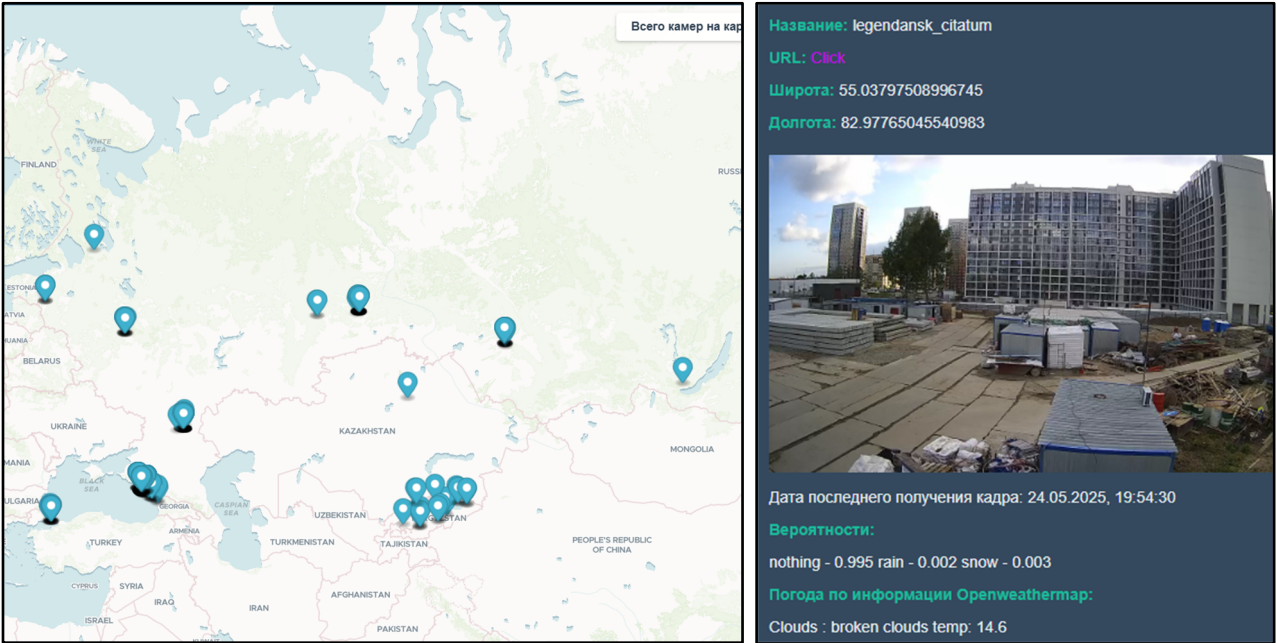


Рис. 2. Скриншоты разработанной системы – интерактивная карта доступных видеокamer и пример информации с конкретной камерой

Особого внимания заслуживает разработанный механизм временной синхронизации видеопотоков и метеоданных, обеспечивающий высокую достоверность обучающей выборки (кадр снимается в момент осадков). Дальнейшее развитие системы видится в расширении функциональности веб-интерфейса и увеличении покрытия за счет подключения дополнительных источников видеоданных (CCTV камер).

Результаты

Экспериментальные исследования продемонстрировали высокую эффективность предложенного подхода к детекции атмосферных осадков на основе анализа видеопотоков с камер наружного наблюдения. Разработанная методика формирования датасета позволила создать репрезентативную выборку объемом 200 тыс. изображений с точной временной привязкой к метеорологическим данным. Сравнительный анализ методов классификации выявил существенное преимущество глубокого обучения перед традиционными подходами - модель EfficientNet достигла F1-меры 0.84, что на 13.5% выше результатов лучшего классического алгоритма (HOG + градиентный бустинг).

Разработанный веб-интерфейс обеспечивает удобную визуализацию результатов в реальном времени, позволяя отслеживать осадки на интерактивной карте с отображением данных по каждой камере.

Заключение

Проведенное исследование показало перспективность использования камер наружного видеонаблюдения для создания систем мониторинга атмосферных осадков. Основной научный вклад работы заключается в разработке комплексной методики, объединяющей автоматизированный сбор видеоданных, их синхронизацию с метеорологическими показателями и современные алгоритмы компьютерного зрения для классификации погодных условий. Сравнительный анализ продемонстрировал, что переход от традиционных методов обработки изображений к глубокому обучению позволяет существенно повысить точность распознавания осадков, что особенно важно при работе с видеопотоками низкого качества. Практическая значимость исследования подтверждается созданием работоспособной системы, включающей не только алгоритмы анализа, но и удобный веб-интерфейс для визуализации результатов.

Разработанное решение может быть использовано метеорологическими службами для дополнения существующих методов наблюдения. Особый интерес представляет перспектива интеграции разработанного подхода с существующими системами прогноза погоды, что позволит создать подход для оценки и коррекции предсказаний таких систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fiallos-Salguero M. et al. Computer Vision-Based Method for Rainfall Estimation Using CCTV Cameras and Smartphone Videos // 15th International Conference on Hydroinformatics. – 2024. – P. 284.

2. Wang X. et al. Surveillance camera-based deep learning framework for high-resolution ground hydrometeor phase observation // *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*. – 2025. – Vol. 2025. – P. 1-38.
3. Manuel F. S. et al. Toward accurate and scalable rainfall estimation using surveillance camera data and a hybrid deep-learning framework // *Environmental Science and Ecotechnology*. – 2025. – P. 100562.
4. Byun J. et al. Snowfall intensity estimation based on convolutional neural networks using CCTV data // *Journal of Korea Water Resources Association*. – 2025. – Vol. 58. – No. 4. – P. 313-327.
5. Rajabi F., Faraji N., Hashemi M. An efficient video-based rainfall intensity estimation employing different recurrent neural network models // *Earth Science Informatics*. – 2024. – Vol. 17. – No. 3. – P. 2367-2380.
6. Bossu J., Hautiere N., Tarel J. P. Rain or snow detection in image sequences through use of a histogram of orientation of streaks // *International journal of computer vision*. – 2011. – Vol. 93. – P. 348-367.
7. Khan M. N. et al. Multilevel weather detection based on images: A machine learning approach with histogram of oriented gradient and local binary pattern-based features // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. – 2021. – Vol. 25. – No. 5. – P. 513-532.
8. Penide G. et al. Comparison of two convective/stratiform precipitation classification techniques: Radar reflectivity texture versus drop size distribution-based approach // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – 2013. – Vol. 30. – No. 12. – P. 2788-2797.
9. Mutasodirin M. A., Falakh F. M. Efficient Weather Classification Using DenseNet and EfficientNet // *Jurnal Informatika: Jurnal Pengembangan IT*. – 2024. – Vol. 9. – No. 2. – P. 173-179.
10. Официальный сайт системы мониторинга атмосферных осадков CCTVForecast [Электронный ресурс]. URL: <https://cctvforecast.ru/> (дата обращения: 20.05.2025).

© И. В. Овсянников, С. А. Рылов, 2025

С. А. Рылов^{1✉}, А. С. Лапушинский²

Геоинформационная система для автоматизированного мониторинга площадей водных объектов

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 представлена геоинформационная система, позволяющая проводить автоматизированный мониторинг изменения площадей и границ выбранных водоемов по спутниковым снимкам. Система состоит из трех основных компонент: серверная часть, веб-интерфейс и база данных на основе PostGIS. В системе реализована возможность автоматического поиска и загрузки подходящих спутниковых снимков Sentinel-2 и Landsat. Реализовано три алгоритма выделения водной поверхности (NDWI, MNDWI и K-means) и необходимые методы предобработки спутниковых данных и постобработки получаемых результатов. В результате работы системы пользователь через веб-интерфейс может посмотреть как результаты выделения границ водного объекта по отдельным снимкам, так и графики изменения площади водоема, полученные различными алгоритмами. Таким образом, разработанная система позволяет автоматизировать процесс наблюдения за изменениями границ и площадей водоемов.

Ключевые слова: ГИС, мониторинг, водоемы, озеро, площадь, автоматизация, спутниковые снимки, Sentinel-2, Landsat, выделение водной поверхности

S. A. Rylov^{1✉}, A. S. Lapushinskii²

Geoinformation system for automated monitoring of water body surface areas

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 presents a geoinformation system that allows automated monitoring of area and boundary changes of the selected water bodies using satellite images. The system consists of three main components: a server part, a web interface, and a PostGIS-based database. The system can automatically search and download suitable Sentinel-2 and Landsat satellite images for a selected water body. Three algorithms for water surface segmentation (NDWI, MNDWI, and K-means) were implemented, so as the methods for preprocessing satellite data and postprocessing the segmentation results. As a result, the user can view both the results of water boundary extraction on individual images and also charts of water body area changes obtained using various algorithms via the web interface. Thus, the developed system allows significant automation of the process of monitoring of water bodies area and boundary changes.

Keywords: monitoring, water body, lake, area, automation, satellite images, Sentinel-2, Landsat, water surface segmentation

Введение

Мониторинг состояния водных объектов, таких как озера, может быть важен для задач гидрологии, экологии, сельского и рыбного хозяйства. Проведение регулярного мониторинга большого числа водных объектов с помощью полевых исследований даже в рамках отдельных регионов является практически невозможным ввиду больших трудозатрат и труднодоступности многих озер. Эта проблема может быть в значительной степени решена с помощью дистанционного зондирования Земли [1]. Спутниковые снимки позволяют получать объективную информацию о большей части поверхности Земли с достаточно регулярной периодичностью.

Однако, даже для оценки изменения площади отдельных озер с помощью спутниковых данных за несколько лет или десятилетий, требуется провести достаточно большой объем работ: необходимо выбрать подходящие снимки, скачать их, провести необходимую обработку, сегментировать интересующий объект и оценить результаты. Поэтому такие работы зачастую проводятся только по отдельным озерам, например: озеро Убинское [2], озеро Кулундинское [3], озеро Саргамыш [4], озеро Гарда [5] и другие. Автоматизация процесса решения таких задач может позволить существенно ускорить подобные исследования, охватить большее число озер, а также стандартизировать получаемые результаты [6].

Существуют доступные сервисы, предоставляющие функционал наблюдения за водными объектами, например: NASA Worldview, Global Surface Water Explorer, Aqua Monitor. Они имеют глобальный охват и позволяют визуализировать изменения водных поверхностей, но они неудобны при оценке конкретных водоемов, нельзя оценить, исправить или добавить полученные результаты.

В данной работе представлена геоинформационная система (ГИС), позволяющая проводить автоматизированный мониторинг изменения площадей и границ выбранных водоемов по спутниковым снимкам.

Процесс обработки спутниковых данных

На данный момент предлагаемая геоинформационная система работает с оптическими мультиспектральными данными спутниковой съемки. Наиболее подходящими для задачи мониторинга озер являются данные со спутников серий Sentinel-2 и Landsat ввиду их доступности, достаточно высокого пространственного разрешения (10 и 30 м) и периодичности съемки (5-10 дней), а также больших объемов данных, накопленных за время работы. Помимо спутниковых данных в системе также используются данные сервиса OpenStreetMap для поиска координат и названий водных объектов.

После того, как пользователь системы задает водоем и интересующий период для наблюдения, из доступных снимков выбираются те, которые полностью покрывают объект интереса, и оценка облачности снимка составляет менее 10%. В систему загружаются фрагменты снимков, захватывающие исследуемый водный объект с запасом 25% с каждой стороны от крайних координат водоема, из-

вестных по данным OpenStreetMap. Из множества спектральных каналов берутся только пять: Red, Green, Blue, NIR, SWIR.

Для выделения водной поверхности на полученных изображениях в системе одновременно используется три метода: спектральные разностные индексы NDWI и MNDWI [7], а также алгоритм кластеризации K-means. Индексы рассчитываются попиксельно, выделение водных пикселей происходит по фиксированному порогу. А при кластеризации для каждого кластера считается среднее значение индекса NDWI, и уже весь кластер по порогу относится к водному или нет.

На многих снимках присутствует не один, а множество водных объектов, которые могут и соприкасаться. Поэтому после выделения водных пикселей на изображении необходимо установить, какие из них относятся к исследуемому объекту. Для этого в системе выполняется специальная процедура, позволяющая отделить водоем от других водных объектов.

Архитектура и основные компоненты геоинформационной системы

Разрабатываемая геоинформационная система состоит из трех основных составляющих: сервер, веб-клиент и база данных.

Сервер выполняет связующую роль между всеми составляющими, а также занимается задачами обработки и получения изображений. Он состоит из двух компонент. Первая написана на языке Go и контролирует непосредственную работу сервера, взаимодействует с базой данных и обрабатывает запросы клиентской части. Для поддержания очереди задач используются встроенные методы языка Go. Вторая компонента написана на языке Python и представлена в виде скриптов, вызываемых первой компонентой. Скрипты отвечают за работу со снимками и векторными картами. Осуществляют поиск и загрузку изображений с внешних сервисов Sentinel Hub и Google Earth Engine с помощью соответствующих API и содержат методы взаимодействия с сервисом OpenStreetMap. Для работы с растровыми и векторными данными используется библиотека GDAL. Также в этой компоненте реализуются алгоритмы выделения воды на снимках: NDWI, MNDWI и K-Means.

База данных построена на основе PostgreSQL. Она хранит всю необходимую строковую и численную информацию, а также векторные полигоны, благодаря расширению PostGIS. Однако хранение самих снимков было реализовано иначе. В базе данных хранятся только ссылки, а сами файлы снимков хранятся в объектном хранилище MinIO.

Клиентская часть системы была реализована с использованием JavaScript фреймворка Vue.js. Основной элемент пользовательского интерфейса – интерактивная карта, на которой отображаются растровые и векторные данные и результаты их обработки (спутниковые снимки и границы водоемов). Для ее реализации была выбрана библиотека OpenLayers.

Работа пользователя с геоинформационной системой

Главная страница веб-интерфейса геоинформационной системы содержит интерактивную карту, на которой отображаются все водоемы. У пользователя

есть возможность выбрать интересующий его водоем и перейти на страницу с информацией о выбранном водоеме. Если интересующего водоема нету на основной карте, то имеется возможность для его добавления.

На странице с информацией о выбранном водоеме (рис. 1) пользователь может посмотреть загруженные в систему снимки этого водоема и результаты их обработки – границу и площадь водоема. Также на этой странице отображаются графики изменения площади водного объекта по данным спутниковых снимков, разными цветами отображаются результаты разных методов выделения воды. Все результаты определения площади водоема можно скачать в табличном виде.

Авторизованные пользователи могут задавать системе задания по загрузке и обработке снимков для выбранных им водоемов, указывая требуемый период времени наблюдений. После чего система загрузит подходящие снимки, проведет необходимую обработку и вышлет уведомление о готовности результатов.

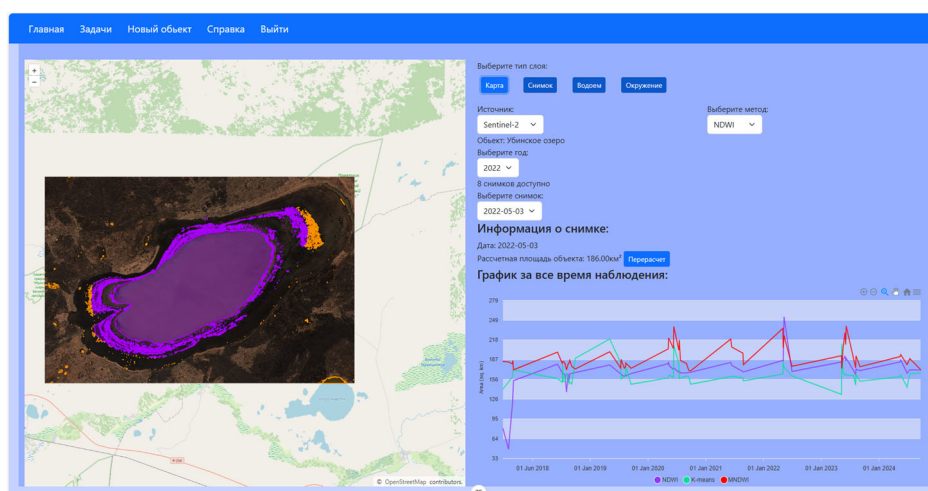


Рис. 1. Скриншот страницы разрабатываемой геоинформационной системы

Заключение

В данной работе представлена геоинформационная система, позволяющая проводить автоматизированный мониторинг изменения площадей и границ выбранных водоемов по спутниковым снимкам. Система состоит из трех основных компонент: серверная часть, веб-интерфейс и база данных, устройство которых описано в данной статье. В системе реализована возможность автоматического поиска и загрузки подходящих спутниковых снимков Sentinel-2 и Landsat для выбранного водоема за указанный период времени. Реализовано три алгоритма выделения водной поверхности (NDWI, MNDWI и K-means) и необходимые методы предобработки спутниковых данных и постобработки получаемых результатов. В результате работы системы пользователь через веб-интерфейс может посмотреть как результаты выделения границ водного объекта по отдельным снимкам, так и графики изменения площади водоема, полученные различными алгоритмами.

Таким образом, разработанная геоинформационная система позволяет автоматизировать процесс наблюдения за изменениями границ и площадей водоемов, что может сильно сократить время решения подобных задач и вместе с тем увеличить число исследуемых водоемов.

В дальнейшем планируется внедрение более эффективных методов выделения водной поверхности на мультиспектральных изображениях [8], расширение списка используемых источников данных и создание алгоритмов автоматического обнаружения ошибочных результатов сегментации и их коррекции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лямина В.А., Глушкова Н.В., Смоленцева Е.Н., Зольников И.Д. Использование методов ГИС и ДЗ для мониторинга площади озер и солончаков на территории юга Западной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2010. – Т. 4. – №. 2. – С. 3-7.
2. Рылов С.А. Многолетний мониторинг усыхания озера Убинское по спутниковым данным Landsat 4,5,7,8 с помощью специализированных алгоритмов сегментации // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 1. – № 4. – С. 102-108.
3. Лукерина Г.В., Лукерин А.Ю. Динамика площади озера Кулундинское Алтайского края по спутниковым данным // Современное состояние водных биоресурсов и аквакультуры: Материалы научно-практической VII международной конференции, Новосибирск, 06–07 ноября 2024 года. – Новосибирск: ИЦ НГАУ "Золотой колос", 2024. – С. 87-93.
4. Пыгамов Ш.О., Аразгелдиева С. Мониторинг водных объектов с использованием ГИС-технологий на примере озера Сарыгамыш // Современные проблемы рационального природообустройства и водопользования: Материалы III Международной научной конференции, Красноярск, 19 ноября 2024 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2025. – С. 81-84.
5. Ghirardi N. et al. Evaluation of macrophyte community dynamics (2015–2020) in southern Lake Garda (Italy) from Sentinel-2 data // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – No. 5. – P. 2693.
6. Донцов А.А., Суторихин И.А. Специализированная геоинформационная система автоматизированного мониторинга рек и водоемов // Вычислительные технологии. – 2017. – Т. 22, № 5. – С. 39-46.
7. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International journal of remote sensing. – 2006. – Vol. 27. – No. 14. – P. 3025-3033.
8. Рылов С.А. Использование активного обучения для выделения водных объектов на спутниковых изображениях // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : Материалы VII Международной научной конференции, Красноярск, 29 сентября – 02 октября 2020 года / Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. – С. 122-126.

© С. А. Рылов, А. С. Лапушинский, 2025

М. Е. Сиденко^{1,2}, С. А. Рылов²✉

Влияние спектральных характеристик и методов предобработки спутниковых снимков при выделении водной поверхности

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: RylovS@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача выделения водной поверхности на оптических спутниковых снимках в условиях паводков. Был использован подход с предварительной кластеризацией изображения и последующей пороговой классификацией по спектральным индексам. Проведено сравнение качества результатов, полученных на данных со спутников Sentinel-2 и Landsat 8/9 при различных вариантах предварительной обработки данных. Получены результаты для двух вариантов расчета спектральных индексов, на оригинальных данных и на данных, полученных после линейного процентного растяжения. Также были рассмотрены два варианта расчета значений индексов для кластеров, при попиксельном усреднении и при вычислении индекса на усредненных значениях яркостей спектральных каналов. Экспериментальные результаты показали, что наилучшими индексами для данной задачи оказались MSAVI, ATSAVI, NDWI, NDVI, NIR.

Ключевые слова: аэрокосмические изображения, атмосферная коррекция, спектральные индексы, линейное растяжение, выделение водных объектов

М. Е. Sidenko^{1,2}, S. A. Rylov²✉

The influence of spectral characteristics and preprocessing methods on water segmentation on satellite images

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: RylovS@mail.ru

Abstract. The paper considers the problem of water surface segmentation on optical satellite images under flood conditions. An approach with preliminary image clustering and subsequent threshold classification by spectral indices was used. A comparison of the quality of the results obtained on the data from Sentinel-2 and Landsat 8/9 satellites with different preliminary data processing options was performed. The results were obtained for two options for calculating the spectral indices, on the original data and on the data obtained after linear percentage stretching. Two options for calculating the index values for clusters were also considered, with pixel-by averaging and with index calculation on the averaged values of spectral bands. The experimental results showed that the best indices for this problem are MSAVI, ATSAVI, NDWI, NDVI, NIR.

Keywords: aerospace imagery, atmospheric correction, spectral indexes, linear stretching, allocation of water bodies

Введение

Полноценное решение задачи оперативного мониторинга паводковой ситуации не представляется возможным без использования данных дистанционного зондирования Земли. В настоящее время существует огромное количество космических аппаратов, осуществляющих оптическую съемку поверхности Земли, однако при решении задачи мониторинга паводковой ситуации наиболее подходящими являются спутники серии Sentinel-2 и Landsat-8/9. Это обусловлено их достаточно высоким пространственным разрешением, глобальным покрытием, регулярностью съемки, высоким качеством данных и доступностью.

Задача сегментации разливов в связи с паводками сложна тем, что вода в затопляемых районах имеет крайне широкий спектр возможных спектральных характеристик, из-за примесей растительности и почвы [1]. Проблему также усугубляет возможная высокая облачность в районах затопления или горный рельеф местности [2]. При выделении воды в таких условиях часто возникают ошибки сегментации водной поверхности на тенях от облаков или рельефа местности, увлажненных почвах и краях облаков, на которых часто наблюдается смещение каналов из-за их высоты и относительного движения [3]. Поэтому разработка алгоритма выделения воды, способного работать в сложных условиях является актуальной задачей.

Одним из важнейших этапов предобработки спутниковых снимков является атмосферная коррекция, особенно для использования пороговых методов сегментации с фиксированным порогом. Однако имеющиеся данные не всегда имеют атмосферную коррекцию и даже качественную радиометрическую коррекцию. В связи с этим интересна разработка алгоритмов выделения водной поверхности, не требующих обязательной атмосферной коррекции.

Цель данного исследования заключается в определении влияния уровня предобработки спутниковых снимков серии Sentinel-2 и Landsat-8/9 на работу методов выделения водной поверхности.

Материалы и методы

Сибирским Центром «НИЦ «Планета» были предоставлены снимки разливов рек, сделанные аппаратами Sentinel-2 в количестве 10 штук, из которых 4 снимка имеют уровень коррекции L1C, 3 снимка - уровень L2A, и еще 3 снимка с обоими уровнями коррекции. Также были получены снимки Landsat-8/9 в количестве 5 штук, из которых два имели уровень коррекции L1TP, один с уровнем L2SP и еще два с обоими уровнями коррекции.

Для каждого снимка было проведено линейное процентное растяжение данных исходных каналов Red, Green, Blue, NIR в диапазон [0, 255], с обрезкой 1% значений с краев. Данная операция призвана снизить влияние спектральных искажений и сдвигов на качество работы алгоритмов выделения водной поверхности.

В данной работе рассматривается подход с предварительной кластеризацией изображения и последующей классификацией полученных кластеров на

водные и неводные. Такой подхода позволяет повысить устойчивость результатов и снизить влияние выбросов [3, 4]. После линейного растяжения была проведена кластеризация изображений методом k -средних, с параметром $k=50$. Каждый из кластеров затем был вручную размечен на классы «вода», «почва», «непроницаемые облака». Кластеры, на которых алгоритмы не смогли отделить водные части от неводных, а также кластеры облаков были исключены из дальнейшего рассмотрения. Итоговый объем выборки составил 49 водных и 436 почвенных кластера для Sentinel-2, 26 водных и 60 почвенных кластера для Landsat.

Для каждого полученного кластера затем были вычислены следующие спектральные индексы: NDWI [5], NDVI, Datt, Datt2 [6], EVI [7], MSAVI [8], ATSAVI [9]. Выбор этих индексов обусловлен их известностью при решении задачи выделения водных объектов [10]. Индексы были посчитаны как на оригинальных данных, так и на данных после линейного растяжения. Спектральные индексы рассчитывались в двух вариантах – как усредненные значения индекса, вычисленного для всех пикселей кластера, и как отношение средних значений спектральных каналов по пикселям кластера. Второй вариант мог бы быть удобен для дальнейшего расчета новых индексов по имеющимся средним значениям яркостей спектральных каналов. При невозможности вычисления индекса в связи с делением на ноль, значение индекса в таких пикселях считалось равным нулю.

Для определения влияния линейного растяжения и методики подсчета индекса на разделимость классов были использованы пороговый метод для одномерного случая и алгоритм классификации случайного леса для многомерного случая. Для порогового метода метрикой качества была выбрана F1 с макроусреднением для минимизации влияния несбалансированности выборки. Порог выбирался исходя из максимизации F1 метрики.

Результаты

На рис. 1 представлены гистограммы распределения значений индекса NDWI, вычисленного на оригинальных данных для разных уровней атмосферной коррекции. Явно виден качественный характер различий этих распределений. На рис. 2 представлены гистограммы распределения значений индекса NDWI, посчитанного после применения линейного растяжения. Можно видеть, что качественное различие между гистограммами было устранено.

В ходе применения порогового алгоритма классификации к снимкам были выявлены признаки, показавшие лучшие значения по метрике F1. Вне зависимости от методики подсчета, пятерка лучших индексов получилась следующей: MSAVI, ATSAVI, NDWI, NDVI, NIR. В табл. 1 представлены результаты для оригинальных данных и при применении линейного растяжения в случае расчета индекса как среднего значения по пикселям кластера. В табл. 2 представлены результаты для случая расчета индексов по усредненным значениям яркостей спектральных каналов.

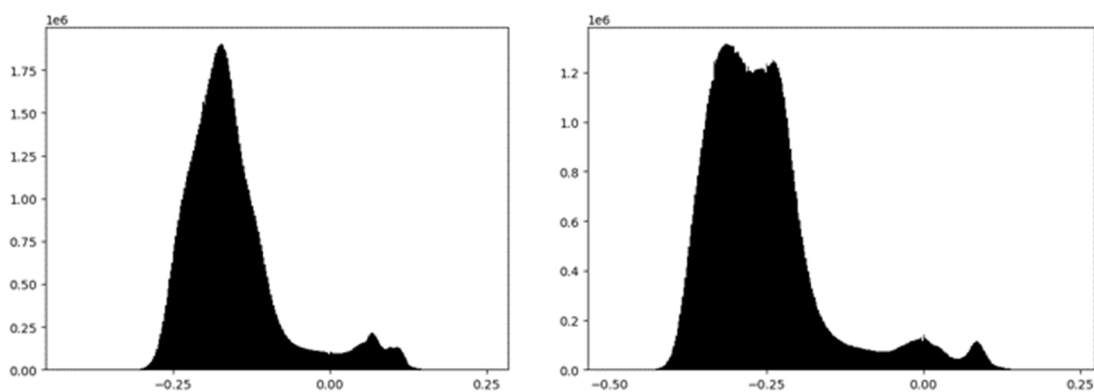


Рис. 1. Гистограммы индекса NDWI для изображения Sentinel-2: уровень предобработки L1C (слева) и уровень предобработки L2A (справа)

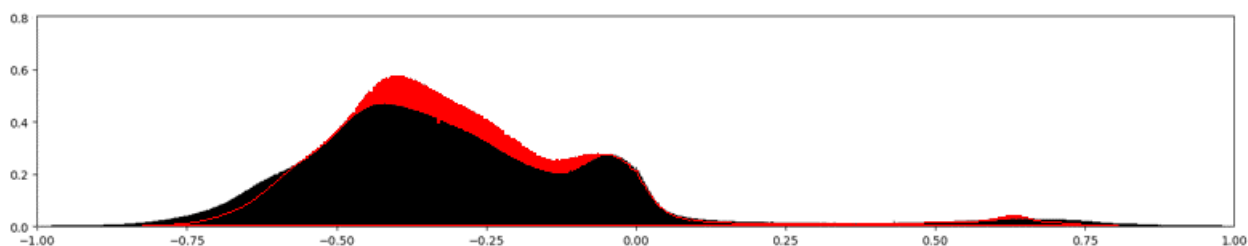


Рис. 2. Гистограммы индекса NDWI после линейного растяжения: для уровня предобработки L1C и уровня предобработки L2A (красным цветом)

Сравнив приведенные таблицы, можно увидеть, что результаты разделения с предварительным линейным процентным растяжением оказываются в среднем немного выше, чем на оригинальных данных. Также можно видеть, что при расчете индекса как среднего значения по пикселям кластера результаты оказались выше для всех индексов. В свою очередь, для многомерного случая влияние предварительного растяжения каналов на точность классификации требует более тщательного изучения, так как на исследуемом объеме данных алгоритм классификации случайного леса успешно справился с классификацией всех кластеров независимо от применения линейного растяжения и метода подсчета значений индексов. В этом случае по критерию Джини (Gini) пятерку наиболее значимых признаков составили: MSAVI, ATSAVI, NDWI, NDVI, NIR.

Заключение

В работе рассматривалась задача выделения водной поверхности на оптических спутниковых снимках в условиях паводков. Был использован подход с предварительной кластеризацией изображения и последующей пороговой классификацией по спектральным индексам. Исследовалось влияние атмосферной коррекции и методов предобработки данных на качество выделения воды.

Проведено сравнение результатов, полученных при двух вариантах расчета спектральных индексов – на оригинальных данных и на данных после линейного процентного растяжения. Также использовались два варианта расчета значений

индексов для кластеров – при попиксельном усреднении и при вычислении индекса на усредненных значениях яркостей спектральных каналов.

Экспериментальные результаты, полученные на данных со спутников Sentinel-2 и Landsat 8/9, показали, что линейное растяжение позволяет снизить качественное различие между гистограммами водного индекса NDWI в случае наличия и отсутствия атмосферной коррекции. При этом применение линейного растяжения слабо влияет на получаемые результаты сегментации пороговым алгоритмом по выбранному спектральному индексу. При расчете индекса как среднего значения по пикселям кластера результаты оказались выше для всех индексов, соответственно такой способ является предпочтительным. Также были получены результаты сравнения качества результатов для различных спектральных индексов, самые высокие результаты показали MSAVI, ATSAVI, NDWI, NDVI, NIR (в порядке убывания). Применение алгоритма классификации случайного леса с использованием множества признаков показало высокую эффективность.

В дальнейшем планируется увеличить объем данных для подсчета статистики с целью выбора наилучших признаков и порогов для создания максимально универсального алгоритма выделения водной поверхности и добавление специализированных алгоритмов для обработки особых случаев [11].

Таблица 1

Результаты применения порогового алгоритма с методикой расчета индекса как усредненного значения по всем пикселям кластера

Линейное растяжение	F1-macro	Оригинальные данные	F1-macro
MSAVI	0,898	MSAVI	0,888
NDWI	0,832	NDWI	0,836
ATSAVI	0,875	ATSAVI	0,798
NDVI	0,862	NDVI	0,786
NIR	0,729	NIR	0,693

Таблица 2

Результаты применения порогового алгоритма с методикой расчета индекса по усредненным значениям яркостей спектральных каналов

Линейное растяжение	F1-macro	Оригинальные данные	F1-macro
MSAVI	0,828	MSAVI	0,861
NDWI	0,825	NDWI	0,829
ATSAVI	0,841	ATSAVI	0,786
NDVI	0,837	NDVI	0,780
NIR	0,729	NIR	0,693

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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Main R., Cho M.A., Mathieu R., O'Kennedy M.M., Ramoelo A., Koch S. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2011. – Vol. 66. – No. 6. – P. 751-761.
7. Huete A.R., Liu H.Q., Batchily K., Leeuwen W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS // *Remote sensing of environment*. – 1997. – Vol. 59. – No. 3. – P. 440-451.
8. Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., Sorooshian S. A modified soil adjusted vegetation index // *Remote sensing of environment*. – 1994. – Vol. 48. – No. 2. – P. 119-126.
9. Baret F., Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment // *Remote sensing of environment*. – 1991. – Vol. 35. – Iss. 2-3. – P. 161-173.
10. Кучма М.О. Применение физических и нейросетевых методов в задаче оперативного детектирования водной поверхности // *Метеорология и гидрология*. – 2024. – № 4. – С. 67-77.
11. Рылов С.А. Использование активного обучения для выделения водных объектов на спутниковых изображениях // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы VII Международной научной конференции, Красноярск, 29 сентября – 02 октября 2020 года / СФУ, ИКИТ. – Красноярск: СФУ, 2020. – С. 122-126.

© М. Е. Сиденко, С. А. Рылов, 2025

М. А. Сквазников¹✉, Д. Л. Колыгин¹

Космический мониторинг объектов наземной транспортной инфраструктуры в зоне чрезвычайной ситуации

¹Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: vka@mil.ru

Аннотация. Космический мониторинг предлагается использовать в целях повышения достоверности и оперативности предоставляемой информации о состоянии отдельных элементов транспортной инфраструктуры при планировании доставки грузов в зону чрезвычайной ситуации. Для описания логистики наземных транспортных перевозок разработан сетевой граф. В качестве исходных данных выступают характеристики условий движения, инфраструктуры и погрузочно-разгрузочных операций, параметры колесной, гусеничной техники и железнодорожных вагонов. Полученные значения интенсивностей транспортного потока на отдельных участках сети позволяют оценить пропускную способность всей транспортной сети и сформировать альтернативные пути в ориентированном графе, описывающем наземные транспортные перевозки. Разработанный алгоритм расчета интенсивностей транспортного потока позволяет осуществлять мониторинг состояния объектов транспортной инфраструктуры, выявления разрушений и затоплений в зоне чрезвычайной ситуации в целях оптимизации маршрутов наземных перевозок.

Ключевые слова: наземные транспортные перевозки, сетевой граф, космический мониторинг, оптимизация маршрутов наземных перевозок

М. А. Skvaznikov¹✉, D. L. Kolygin¹

Space monitoring of ground transportation infrastructure objects in emergency zones

¹Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia
e-mail: vka@mil.ru

Abstract. Space monitoring is proposed to enhance the reliability and timeliness of information about the condition of specific elements of transportation infrastructure when planning cargo delivery to emergency zones. A network graph has been developed to describe the logistics of ground transportation. The initial data include characteristics of traffic conditions, infrastructure, loading and unloading operations, as well as parameters of wheeled, tracked vehicles, and railway wagons. The obtained values of traffic flow intensities on specific network segments allow for the assessment of the entire transportation network's capacity and the formation of alternative paths in a directed graph describing ground transportation. The developed algorithm for calculating traffic flow intensities enables monitoring the condition of transportation infrastructure objects, identifying damages and floods in emergency zones, and optimizing ground transportation routes.

Keywords: ground transportation, network graph, space monitoring, optimization of ground transportation routes

Введение

Транспортная инфраструктура – важнейший элемент материального производства и обеспечения жизнедеятельности населения.

Задачи повышения эффективности ее функционирования решаются на современном этапе оптимизацией маршрутной сети, совершенствованием способов организации движения и транспортного планирования.

В целях поиска факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на качество транспортных перевозок, используется большое количество математических моделей.

При строительстве сложных, пространственно-распределенных транспортных систем используются макроскопические модели, представляющих транспортные потоки в виде газо- и гидродинамических процессов. К ним относятся кинетические модели, модели Танака, Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR), Пейна и др. [1-6].

В случае описания локальных участков транспортной сети применяют микроскопические модели, такие как модели Ньюэлла, клеточных автоматов, и проч. [7-9]. Однако общим недостатком упоминаемых выше моделей является отсутствие решений в случае синхронизированного потока, возникающего при организованной целенаправленной перевозке большого количества грузов определенном заданном направлении, например, при строительстве крупного промышленного объекта, ликвидации последствий природной или техногенной катастрофы и т.д. [10].

При этом данные космической съемки используются в целях повышения достоверности и оперативности предоставляемой информации о состоянии отдельных элементов транспортной инфраструктуры (мостов, развязок, пунктов погрузки (разгрузки) и т.д.) при планировании доставки грузов [11-17].

Методы и материалы

Моделирование наземных транспортных перевозок в зоне чрезвычайной ситуации осуществляется на основе использования сетевого графа $G(X, U)$ – объекта, представляющего множество вершин X и множество связей между вершинами U , и ориентированного от истока (подмножество $D \subseteq X$) к стоку (подмножество $S \subseteq X$) [18-21].

В качестве истоков могут выступать центральные материальные склады, обеспечивающие ликвидацию последствий чрезвычайной ситуации, а стоков – объекты, подлежащие восстановлению. По дугам сети из истока в сток направляется груз. Груз перевозится некоторыми дискретными объектами – транспортными средствами (грузовыми автомобилями, железнодорожными составами).

Дуги сети (i, j) характеризуются пропускной способностью – максимальным количеством груза $r(i, j)$, перевозимым по дуге (i, j) за некоторую единицу времени.

Интенсивность потока по дуге $R(i, j)$ рассчитывается следующим образом:

$$R = \lambda v ,$$

где $\lambda = \frac{n}{L} = \frac{1}{l}$ – плотность потока, 1/км; v – скорость перемещения транспортных средств, км/ч; n – количество транспортных средств; L – расстояние между вершинами графа, км; l – интервал между транспортными средствами, км.

Сетевой граф, описывающий наземные (железнодорожные и автомобильные) транспортные перевозки с центральных материальных складов и специализированных автопарков в зону чрезвычайных ситуаций, показан на рис. 1.

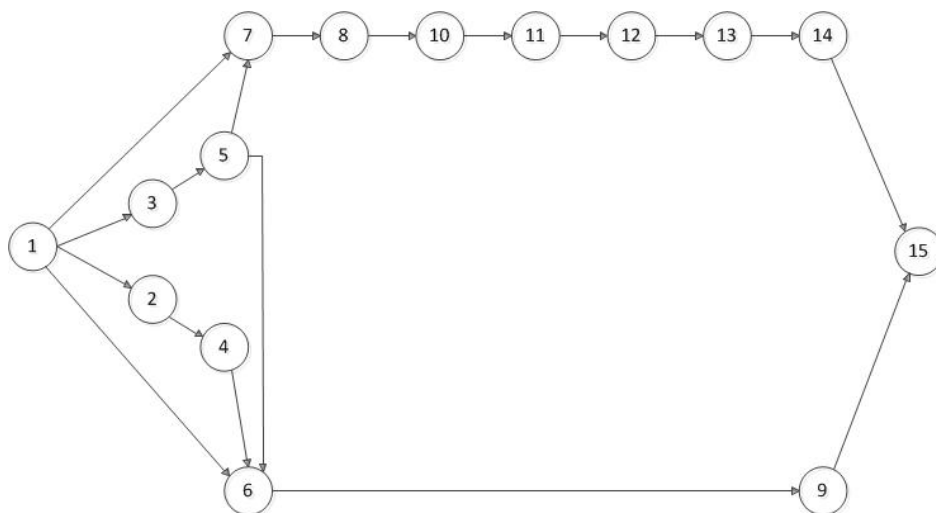


Рис. 1. Сетевой граф наземных транспортных перевозок в зону чрезвычайных ситуаций

На представленном сетевом графе цифрами обозначены следующие события.

1. Отправка грузовой транспортной техники из автопарков.
2. Прибытие грузовой транспортной техники в пункт погрузки на ж/д платформы.
3. Прибытие грузовой транспортной техники на материальные склады.
4. Начало погрузки гусеничной техники на трейлеры.
5. Начало формирования организованных транспортных колонн.
6. Убытие грузовой транспортной техники с материальных складов.
7. Убытие трейлеров с гусеничной техникой.
8. Убытие ж/д платформ с пункта погрузки.
9. Убытие организованных транспортных колонн.
10. Начало формирования состава на сортировочной ж/д станции.
11. Убытие состава с сортировочной ж/д станции.
12. Прибытие состава на сортировочную ж/д станцию в районе чрезвычайной ситуации.
13. Окончание расформирования состава в районе чрезвычайной ситуации.
14. Начало формирования в районе ж/д пункта разгрузки.
15. Прибытие колонн техники на объекты, подлежащие восстановлению в зоне чрезвычайных ситуаций.

Результаты и обсуждение

Разработанный алгоритм представляет собой последовательность операций, выполняемых для расчета интенсивности потоков наземной транспортной инфраструктуры в зависимости от характеристик условий движения, объектов инфраструктуры и погрузочно-разгрузочных операций, параметров колесной, гусеничной техники и железнодорожных вагонов [22].

На первом этапе производится ввод следующих исходных данных, полученных из различных источников (в том числе от средств ДЗЗ) и характеризующих внешние и внутренние условия процесса наземной перевозки грузов.

Первая группа данных характеризует условия движения. К ним относятся: интервал между транспортной техникой в колонне l_a ; интервал между трейлерами в колонне $l_{тр}$; интервал между сцепками платформ l_{g1} ; интервал между железнодорожными составами l_g ; среднее время формирования железнодорожного состава t_{gs} ; среднее время расформирования железнодорожного состава t_{rs} ; эмпирический коэффициент α_i , изменяющийся в зависимости от погодных-климатических условий, характеристик автомагистрали, организации наземных перевозок в пределах $[0,1]$.

Вторая группа данных характеризует объекты инфраструктуры и погрузочно-разгрузочные операции. К ним относятся: количество маршрутов движения из автопарков в железнодорожный пункт погрузки $N(1,7)$; количество маршрутов движения из автопарков на центральные материальные склады $N(1,3)$; количество маршрутов движения из автопарков на пункт погрузки трейлеров $N(1,2)$; количество маршрутов движения колесной техники из автопарков в район формирования колонн $N(1,6)$; количество мест для погрузки колесной техники $N(3,5)$; количество маршрутов движения трейлеров из пункта погрузки в район формирования колонн $N(4,6)$; количество маршрутов движения с центральных материальных складов в район формирования колонн $N(5,6)$; количество маршрутов движения с центральных материальных складов на железнодорожный пункт погрузки $N(5,7)$; количество транспортных колонн для движения в район чрезвычайной ситуации $N(6,9)$; количество маршрутов для передвижения на объекты, подлежащие восстановлению в зоне чрезвычайных ситуаций $N(9,15)$; длительность погрузки единицы грузовой техники t_g ; длительность погрузки трейлера t_r ; длительность погрузки железнодорожной платформы t_p ; длина железнодорожного пункта погрузки l_p ; количество железнодорожных путей в пункте погрузки $N(7,8)$; длительность разгрузки железнодорожной платформы t_{p1} ; количество железнодорожных путей в пункте разгрузки $N(14,15)$.

Третья группа данных описывает параметры колесной, гусеничной техники, трейлеров и железнодорожных вагонов. К ним относятся: количество типов транспортной техники n_1 ; количество типов колесной техники n_2 ; количество типов гусеничной техники n_3 ; скорости различных типов техники в колонне v_i ; средняя скорость движения трейлеров $v_{тр}$; средняя скорость движения техники в колонне при движении в район чрезвычайной ситуации v_m ; средняя длина транспортной техники l_t ; средняя скорость движения колесной техники и трей-

леров в совместной колонне v_{mh} ; средняя скорость движения сцепок платформ по железнодорожным подъездным путям v_{gp} ; средняя длина железнодорожного состава l_{gs} ; средняя скорость движения состава по железнодорожным основным путям v_{gm} .

На следующем этапе осуществляется расчет интенсивности транспортного потока $R(i, j)$ для различных участков транспортной сети:

$$R(1,7) = N(1,7) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n1})}{l_a},$$

$$R(1,3) = N(1,3) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n2})}{l_a},$$

$$R(1,2) = N(1,2) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n3})}{l_a},$$

$$R(1,6) = N(1,6) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n2})}{l_a},$$

$$R(3,5) = \frac{N(3,5)}{t_g},$$

$$R(2,7) = \frac{N(2,7)}{t_r},$$

$$R(4,6) = N(4,6) \frac{v_{tp}}{l_{tp}},$$

$$R(5,6) = N(5,6) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n2})}{l_a},$$

$$R(5,7) = N(5,7) \frac{\min_i(v_1, v_2 \dots v_{n2})}{l_a},$$

$$R(7,8) = \frac{N(7,8)l_p}{t_p l_t},$$

$$R(6,9) = N(6,9) \frac{v_m}{l_a},$$

$$R(9,15) = \sum_{i=1}^{N(9,15)} \alpha_i \frac{v_{mh}}{l_a},$$

$$R(8,10) = \frac{v_{gp}}{l_{g1}},$$

$$R(10,11) = \frac{l_{gs}}{t_{gs}l_t},$$

$$R(11,12) = \frac{v_{gm}}{l_g},$$

$$R(12,13) = \frac{l_{gs}}{t_{rs}l_t},$$

$$R(13,14) = \frac{v_{gp}}{l_{g1}},$$

$$R(14,15) = \frac{N(14,15)l_{p1}}{t_{p1}l_t}.$$

Полученные значения интенсивностей транспортного потока на отдельных участках сети (дугах сетевого графа) можно использовать для расчета пропускной способности всей транспортной сети на основе использования минимаксного критерия.

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет получать численные оценки интенсивности транспортных потоков на отдельных участках транспортной сети, анализировать влияние внешних и внутренних условий на пропускную способность транспортной системы и планировать применение наземного транспорта в целях ликвидации последствий природных и техногенных катастроф.

Мониторинг состояния объектов транспортной инфраструктуры с использованием средств дистанционного зондирования Земли позволяет вскрывать разрушения и затопления в зоне чрезвычайной ситуации. Данные космического мониторинга используются для формирования альтернативных путей в ориентированном графе, описывающем наземные транспортные перевозки.

Применение разработанного алгоритма позволяет повысить качество обработки и анализа данных, полученных от средств дистанционного зондирования Земли, в целях оптимизации структуры транспортной сети при организации наземных перевозок в зоне чрезвычайной ситуации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lighthill M., Whitham G. B. On kinematic waves: II. Theory of traffic flow on long crowded roads // Proc. R. Soc. London, Ser. A. 1955. V229. P.281-345.
2. Richards P.I. Shock Waves on the Highway// Oper. Res. 1956. V4. P.42-51.
3. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.

4. Traffic flow theory: A state-of-the-art report / Editors N. H. Gartner, C. J. Messer, A. K. Rathi. Washington DC: Transportation Research Board, 2001.
5. Payne H.J. Models of freeway traffic and control // Simulation Council Proc. 28, Mathematical Models of Public Systems / Edited by G. A. Bekey. 1971. V 1. P.51-61.
6. Сухинова А. Б., Трапезникова М.А., Четверушкин Б.Н., Чубарова Н.Г. Двумерная макроскопическая модель транспортных потоков // Матем. мод. 2009. Т.21, №2. С. 118-126.
7. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic // Phys. I France. 1992. V.2. P.2221-2229.
8. Kerner B. S., Konhauser P. Structure and parameters of clusters in traffic flow // Phys. Rev. E. 1994. V 50. P.54-83.
9. Newell G.F. Nonlinear effects in the dynamics of car flowing // Oper. Res. 1961. V. 9. P. 209-229.
10. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: Учебное пособие / Издание 2-е, испр. и доп. А. В. Гасников и др. Под ред. А. В. Гасникова. – М.: МЦНМО, 2013. – 215 с.
11. Фролов К.В., Лебедев В.В., Воробьев А.Ю., Гаврилов В.И., Харитонов В.А. Система дистанционного мониторинга транспортных потоков основных магистралей центра Москвы // Проблемы машиностроения и надежности машин. №5. 2000. С. 3-10.
12. Карпик А.П., Лисицкий Д.В. Электронное геопространство – сущность и концептуальные основы // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С.41-44.
13. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3-17.
14. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения / Д. В. Долгополов, Д. В. Никонов, А.В. Полуянова, В.А. Мелкий // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 65-81.
15. Долгополов Д. В. Использование данных дистанционного зондирования земли при формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 151-159.
16. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Олейникова Е. А., Ханнанов Р.Р. Технология автоматизированного проектирования железных дорог с использованием цифровых и математических моделей местности // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 5-18.
17. Сквазников М.А., Лобовко В.В. Модель иерархического распознавания сложных объектов по данным дистанционного зондирования Земли // Труды ВКА имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. № 654 – С.82-88.
18. Попов А.М. Экономико-математические методы и модели: Учебник / А. М. Попов и др. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2019. – 345 с.
19. Гармаш А.Н. Экономико-математические методы и прикладные модели: Учебник / А. Н. Гармаш и др. – 4-е изд., пер. и доп. – М: Изд-во Юрайт, 2019. – 328 с.
20. Власов А.А. Теория транспортных потоков: моногр. / А. А. Власов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 124 с.
21. Мохирев А.П., Герасимова М.М., Медведев С.О. Нахождение маршрута минимальной стоимости транспортного пути при доставке древесины с лесосеки // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 249-261.
22. М.А. Сквазников, Д.Л. Колыгин. Подход к расчету интенсивности транспортных потоков при организации наземных перевозок в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций по данным дистанционного зондирования Земли. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2023. Т.28. №3. С.77-91.

© М. А. Сквазников, Д. Л. Колыгин, 2025

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

Подбор местоположений пробных площадей на исследование пирогенных сосняков

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. Материалы для анализа: данные массовой таксации насаждений, разновременные космические снимки, цифровая модель рельефа раstra SRMT. Дешифровочные признаки: конфигурация выдела, форма рельефа местности, следы хозяйственной деятельности, транспортная доступность. Выявлены потенциально возможные местоположения, на которых расположены сосняки в возрасте от 5 до 7 (лет), от 40 до 60 (лет) и около 100 лет.

Ключевые слова: среднетаежные пирогенные сосняки, дешифровочные признаки, местоположение пробных площадей

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

Selection of locations of trial areas for the study of pyrogenic pine forests

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

Abstract. Materials for analysis: data on mass taxation of plantings, multi-time satellite images, digital elevation model of the SRMT raster. Decoding features: allotment configuration, terrain shape, traces of economic activity, transport accessibility. The potential locations of pine forests aged from 5 to 7 (years), from 40 to 60 (years) and about 100 years have been identified.

Keywords: medium-taiga pyrogenic pine forests, decryption signs, location of trial areas

Введение

Работа выполнена на примере насаждений средней тайги Красноярского края. Тестовый участок расположен в Вороговском участковом лесничестве Борского лесничества. Таксация здесь проводилась в 1995 году. Общее количество лесотаксационных выделов тестового участка – 3849. Из них на сосняки приходится – 1829, березняки – 424, осинники – 45 (рис. 1).

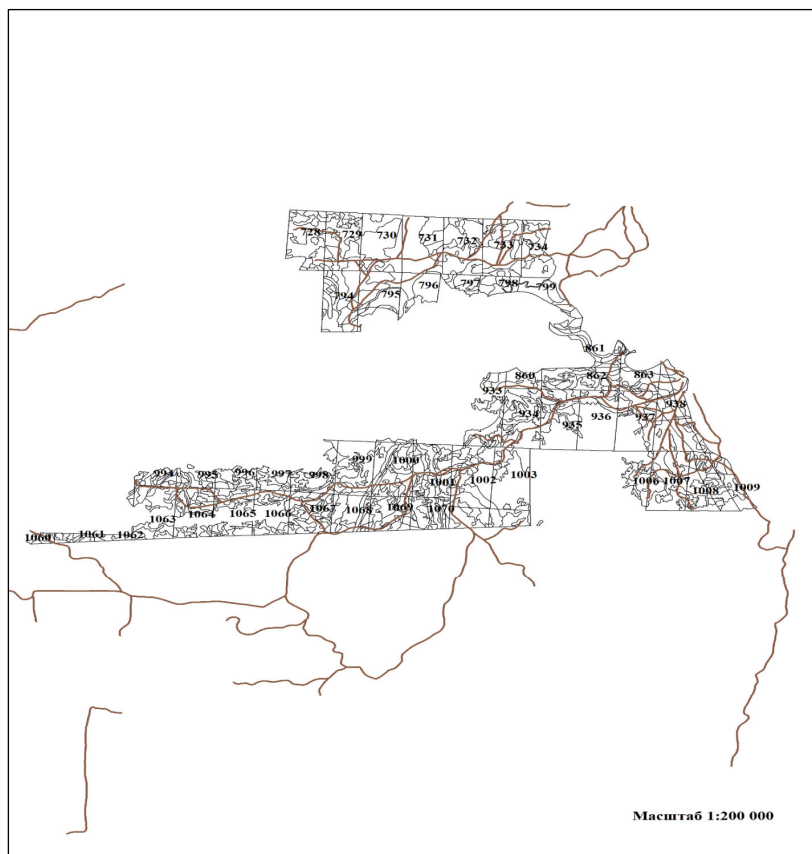


Рис. 1. Участок поиска (Борское лесничество, Вороговское участковое лесничество)

Рельеф тестового участка отличается незначительными уклонами, не препятствующими натурным работам, что подтверждает анализ уклонов на основе раstra SRMT. На участке произрастают насаждения хвойных и лиственных пород пирогенного и послерубочного происхождения. Кроме того, на тестовом участке присутствуют другие категории земель – болота, озера.

Требуется подобрать места для закладки пробных площадей (ПП) в сосняках пирогенного происхождения в возрасте от 5 до 7 (лет), от 40 до 60 (лет) и около 100 лет. Кроме возраста древостоя в качестве критерия отбора следует учитывать транспортную доступность участка. Потенциально доступными считаются выделы, расположенные в пределах 3 км от путей транспорта.

Исходные для анализа данные:

- таксационные описания выделов (данные атрибутивной таблицы ГИС);
- космические снимки Landsat 8 (2010 и 2023 годов) и космические снимки интернет-ресурса Google Earth Pro.

Последовательность поиска ПП

Из массива данных таксационных описаний отсортировываем сосновые насаждения, возраст которых удовлетворяет условиям поиска. Поскольку лесоустройство производилось в 1995 году, то следует учесть, что к 2024 году возраст

древостоев увеличился на 29 лет. Насаждения полученного списка выделов, далее распределяем по происхождению (направлению сукцессии). Дешифровочные признаки – конфигурация выдела, форма рельефа местности, следы хозяйственной деятельности. Насаждения пирогенного происхождения принимаются в качестве потенциально возможных для закладки ПП.

Выделы пирогенных сосновых насаждений в возрасте 5-7 лет

На 1995 год лесоустройством на тестовом участке была зафиксирована одна вырубка 1988 года (квартал 735). Гарей в таксационных описаниях нет. Наименьший возраст соснового насаждения 8 лет (лесные культуры). Насаждения на тестовом участке начинаются с возраста 10 лет, но к 2024 году они уже достигли 39 летнего возраста. Таким образом, по данным массовой таксации послепожарные сосняки в возрасте 5-7 лет на полигоне поиска в настоящее время (2024 год) отсутствуют.

Возможно, пожары были после года лесоустройства. Поиск мест пожара можно провести посредством сличения разновременных снимков. Следует учесть, что изменения могут быть следствием не только лесных пожаров. Изображение на космических снимках свидетельствует, что сосновые насаждения на тестовом участке были вовлечены в промышленную эксплуатацию еще до 1995 года лесоустройства. К местам рубок проложены лесовозные дороги. Последствия хозяйственной деятельности на космических снимках видны достаточно отчетливо. Однако, обнаружить следы лесных пожаров посредством визуального сличения изображения на снимках 2010 года и 2023 года достаточно проблематично. Предварительно следует выявить те места, где произошли изменения. Для этого можно воспользоваться синтезированным изображением разновременных снимков [1, 2]. Такой композит был создан посредством объединения каналов: красный из снимка 2023 г. - красный из снимка 2010 г. - красный из снимка 2023 г. - красный из снимка 2010 г. - ближний ИК из снимка 2023 г.

Изменения на композитном снимке проявились в красных цветовых тонах. Причины изменений разные. Так в отношении береговой линии Енисея или поверхности болот, они связаны с количеством воды (осадков). В отношении древостоев – следствие внешних воздействий - рубок, пожаров. Цветовая гамма изображения не позволяет судить о виде внешнего воздействия. Пожары отличаются по косвенным признакам. В пределах тестового участка обособляется участок гари, охватывающий части квартала 939 и квартала 1007 (рис. 2).

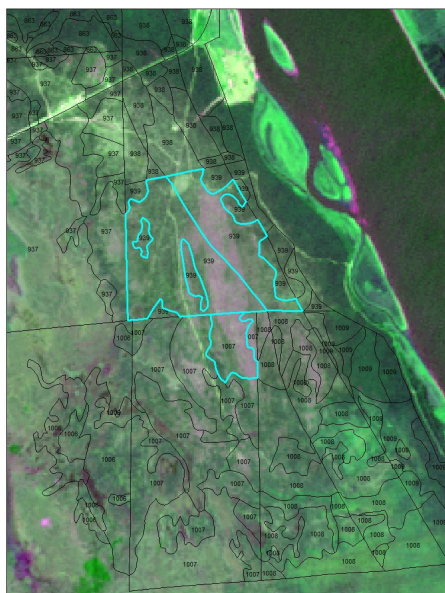


Рис. 2. Местоположение лесного пожара, гари

Пожар был между 2010 и 2024 годами. И если период лесовосстановления на гари закончился, то сосновые молодняки здесь подходят для закладки ПП.

Выделы пирогенных сосновых насаждений в возрасте 40-60 лет

Общее количество выделов, удовлетворяющее условию поиска - 109. Список составлен по данным массовой таксации. Пирогенные сосняки идентифицированы по составу древостоя, характеристике подроста, подлеска. Однако, ошибки не исключаются, часть насаждений списка в действительности может быть и послерубочного происхождения. Предпочтение отдается выделам, расположенным в непосредственной близости от места базирования (табл. 1).

Таблица 1

Пирогенные сосняки в возрасте 40-60 лет: С – сосна, Б – береза, ОС – осина

Квартал	Состав	Полнота	Тип леса	Возраст, год	
				1995	2024
1067	10С	0,8	сосняк лишайниковый	30	59
1067	8С2ОС	0,5	сосняк лишайниковый	30	59
1067	9С1ОС	0,6	сосняк лишайниковый	30	59
1068	6С4Б	1,0	сосняк ягодно-мшистый	30	59
1068	6С4Б	1,0	сосняк ягодно-мшистый	30	59
1069	8С2Б	0,6	сосняк ягодно-мшистый	30	59
1069	7С3Б	0,6	сосняк ягодно-мшистый	30	59

Выделы пирогенных сосновых насаждений в возрасте около 100 лет

Общее количество выделов массовой таксации, удовлетворяющее условию - 25. Ошибки идентификации пирогенных сосняков здесь также не исключаются. Здесь предпочтение также отдается выделам, расположенным в непосредственной близости от места базирования (табл. 2).

Таблица 2

Пирогенные сосняки в возрасте около 100 лет: С – сосна

Квартал	Состав	Полнота	Тип леса	Возраст, год	
				1995	2024
1067	10С	0,4	сосняк лишайниковый	60	89
1067	10С	0,4	сосняк лишайниковый	60	89
1067	10С	0,5	сосняк лишайниковый	80	109
1067	10С	0,5	сосняк лишайниковый	80	109
1067	10С	0,4	сосняк лишайниковый	90	119

Вывод

Лесотаксационный анализ насаждений с привлечением материалов космических съемок позволяет эффективно выявлять потенциально возможные местоположения для закладки пробных площадей для изучения послепожарных сосняков. Применительно к насаждениям от 40 и более лет исчерпывающие исходные данные содержатся в таксационных описаниях выделов. Для поиска сосняков от 5 до 7 лет дополнительно потребовался анализ разновременных космических снимков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плотникова М.А., Хлебникова Е.П. Исследование методов выявления изменений территорий по разновременным космическим изображениям // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – Т. 6, № 2. – С. 48-58.
2. Йехиа Мики. Выявление изменений по разновременным многоспектральным космическим снимкам при мониторинге территорий // Геодезия и картография. – 2010. – № 2. – С. 15-19.

© С. К. Фарбер, Н. С. Кузьмик, А. А. Мартынов, 2025

И. В. Боровко^{1✉}, В. Н. Крупчатников¹

Численное исследование обрушения планетарных волн и их связь с атмосферными блокировками

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: irina@ommfao1.sccc.ru

Аннотация. С помощью модельных данных (использовалась модель INM-CM48) исследуется явление обрушения планетарных волн. В качестве признака обрушения волн используются нитевидные участки полярного вихря в районе тропопаузы - так называемые стримеры. Исследована реакция количества стримеров на климатические изменения. Кроме стандартного сценария потепления за счет увеличения концентрации углекислого газа был использован также сценарий потепления за счет уменьшения альбедо снега и льда. Численно исследована связь стримеров с атмосферными блокировками. Построены зависимости частоты стримеров и блокировок от долготы. Показано, что области максимальных частот стримеров и блокировок не совпадают. Показано, что при обоих сценариях потепления климата происходит уменьшение числа стримеров в рассматриваемых областях в результате усиления струйного течения.

Ключевые слова: стримеры, обрушение волн, полярный вихрь, атмосферные блокирования

I. V. Borovko^{1✉}, V. N. Krupchatnikov¹

Numerical study of planetary waves breaking and their relation to the atmospheric blockings

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: irina@ommfao1.sccc.ru

Annotation. The phenomenon of planetary wave breaking is being investigated using model data (the INM-CM48 model was used). The filamentous sections of the polar vortex in the tropopause region, the so-called streamers, are used as a sign of wave breaking. The reaction of the number of streamers to climate changes has been investigated. In addition to the standard scenario of warming due to an increase in carbon dioxide concentration, a warming scenario due to a decrease in the snow and ice albedo was also used. The relationship of streamers with atmospheric blockings has been numerically investigated. The dependences of the streamers and blockings frequencies on longitude are plotted. It is shown that the areas of maximum frequencies of streamers and blockings do not coincide. It is shown that under both scenarios of climate warming, the number of streamers in the considered areas decreases as a result of the jet stream strengthening.

Keywords: streamers, wave breaking, polar vortex, atmospheric blockings

Введение

Циркуляцию атмосферы принято рассматривать как зонально симметричные поля, на которые наложены волновые возмущения. Значительные погодные аномалии в средних широтах связаны с амплификацией волн Россби. Явление

обрушения волн часто приводит к атмосферным блокировкам, и поэтому представляет интерес.

Обрушение волн разделяют на циклонический и антициклонический тип. Как правило, установлению блокирующего антициклона предшествует обрушение антициклонического типа. В [1] с помощью данных реанализа ERA5 были исследованы климатические показатели и изменчивость процессов опрокидывания волн в районе субтропического течения. Показано, что при наблюдаемых климатических изменениях частота обрушений антициклонического типа имеет положительный тренд.

Мерой интенсивности полярного вихря можно считать потенциальный вихрь Эртеля, который определяется как

$$Q = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta}{\partial p},$$

где θ - потенциальная температура, p - давление, f - параметр Кориолиса, $\xi_p = u_y - v_x$ - вертикальная компонента относительного вихря. При отсутствии неадиабатических источников потенциальный вихрь сохраняется на поверхностях с одинаковой потенциальной температурой. Зонально осредненный потенциальный вихрь Эртеля на изэнтропической поверхности представляет собой монотонную функцию широты, отклонение распределения Q от зонально симметричного может быть описано с помощью вихревой активности и является мерой интенсивности волн Россби. Потенциальный вихрь принято измерять в PVU ($1 \text{ PVU} = \text{m}^2 \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1} \cdot 10^{-6}$ - potential vorticity unit)

Обрушение волны Россби проявляется как необратимое опрокидывание контуров потенциального вихря (ПВ) на изэнтропической поверхности, поэтому для его идентификации используется методика, связанная с так называемыми стримерами — нитевидными вихревыми структурами.

Поскольку местонахождение линии уровня $Q=2\text{PVU}$ с достаточно большой точностью совпадает с тропопаузой, а потенциальный вихрь сохраняется для частицы воздуха, эту линию можно считать динамической тропопаузой. Стримеры линии $Q=2\text{PVU}$ можно считать показателем взаимодействия стратосферы и тропосферы. Они могут быть условно разделены на два типа – стратосферные и тропосферные. Стратосферными считаются стримеры, у которых значение ПВ больше 2PVU , и которые вытягиваются в сторону экватора, тропосферными – стримеры, вытягивающиеся в сторону полюса.

В нашей работе анализировалась частота стримеров полярного вихря и ее реакция на климатические изменения.

Численный эксперимент

Для проводимого эксперимента была использована модель климатической системы INM-CM48[2]. Модель состоит из блоков, воспроизводящих динамику атмосферы, океана, морского льда, растительности и почвы. Разрешение модели

в атмосфере 2.0×1.5 по долготе и широте и 21 уровень по вертикали. Давление на верхнем уровне около 10 hPa.

С помощью модели INM-CM48 проведены численные эксперименты, в которых изменения климата происходят посредством двух различных механизмов. Сравнивались данные трех численных экспериментов. Расчет производился по следующему принципу: сначала модель рассчитывалась до выхода на стационарный режим (60 лет). После рассчитывались 40 лет трех экспериментов. Здесь первый эксперимент (B0) - базовый, в нем все задаваемые параметры оставались неизменными. Во втором (C1) была повышена концентрация углекислого газа с уровня 360 ppm, соответствующего доиндустриальным значениям, до уровня 450 ppm. В третьем эксперименте (A2) были искусственно понижены параметры альбедо сухого и мокрого льда (снега). Исходные значения альбедо, использовавшиеся в модели, 0.8 и 0.6, были уменьшены до 0.7 и 0.5, соответственно. Детали этих экспериментов подробно описаны в [3]. Целью этой работы было определение роли уменьшения количества льда в климатических изменениях Северного полушария. Кроме изменений температурного режима и скорости ветра также анализировались изменения частоты блокирований и распределения вихревой активности.

В нашей работе анализировались изменения частоты стримеров полярного вихря при заданных климатических изменениях. Для этого использовался метод идентификации нитевидных структур, предложенный в работе [4]. Участок контура, ограниченный парой точек, является стримером, если 1) прямое сферическое расстояние между этими точками меньше некоторого порогового значения d 2) длина участка контура, ограниченного этими двумя точками, больше порогового расстояния l . Для выявления вихревых структур синоптического масштаба используются значения $d=800$ км, $l=1500$ км.

Результаты

Опрокидывание волн Россби в средних широтах может быть проанализировано с помощью контуров на поверхности $\theta=310$ К. Для этой поверхности область опрокидываний зимой лежит в полосе (40° - 65° с.ш.) (рис.1) Число опрокидываний максимально в субтропических широтах западной Евразии. Над Восточной Азией для этой поверхности имеется минимум количества стримеров, но он не так выражен, как для более южных поверхностей, что может объясняться большей скоростью зонального ветра. В целом, области местонахождения стримеров согласуются с результатами, полученными для обрушений волн в [1].

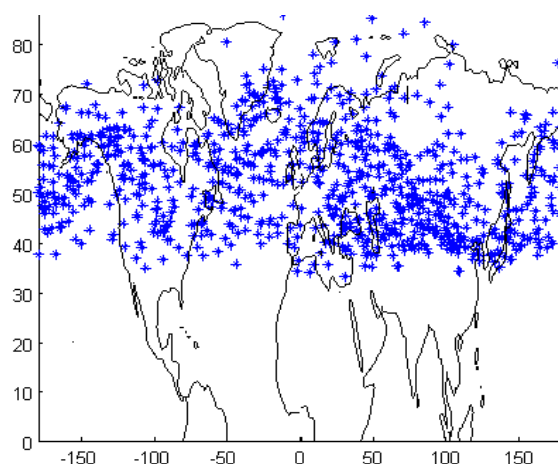


Рис. 1. Местоположение стримеров на поверхности
 $\theta=310K$, декабрь – февраль

В табл. 1. представлено количество стратосферных и тропосферных стримеров на поверхности $\theta = 330K$ за пять лет в трех экспериментах.

Таблица 1

Количество стримеров

Эксперимент	Сезон	Количество вихревых структур	
		Тропосферные стримеры	Стратосферные стримеры
B0	Зима	299	306
A2	Зима	264	252
C1	Зима	200	234
B0	Лето	480	643
A2	Лето	489	571
C1	Лето	439	469

Можно сделать вывод об уменьшении числа стримеров линии $Q=2PVU$ на поверхности в экспериментах с более теплым климатом по сравнению с базовым. Уменьшение числа стримеров происходит как в зимний, так и в летний сезон. Особенно значительным оно является в эксперименте с увеличением концентрации углекислого газа. Скорее всего, это связано с усилением полярного вихря, а также тропосферного струйного течения, в результате выхолаживания полярной стратосферы в C1 [3]. Для линии на поверхности 310 K такого не наблюдается, поскольку во внетропических широтах средний западный ветер, наоборот, ослабляется в обоих экспериментах.

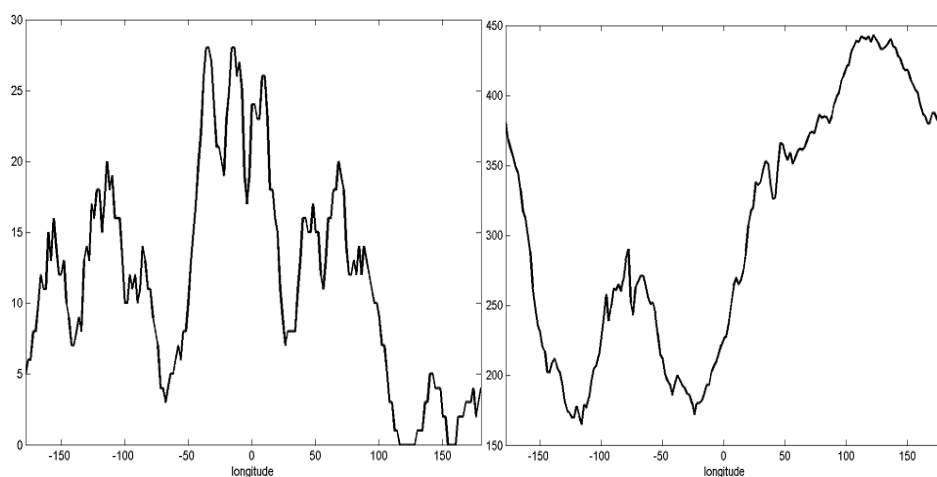


Рис. 2. Слева - количество стримеров в зависимости от долготы, справа - количество блокирований, зима, $\theta=330K$

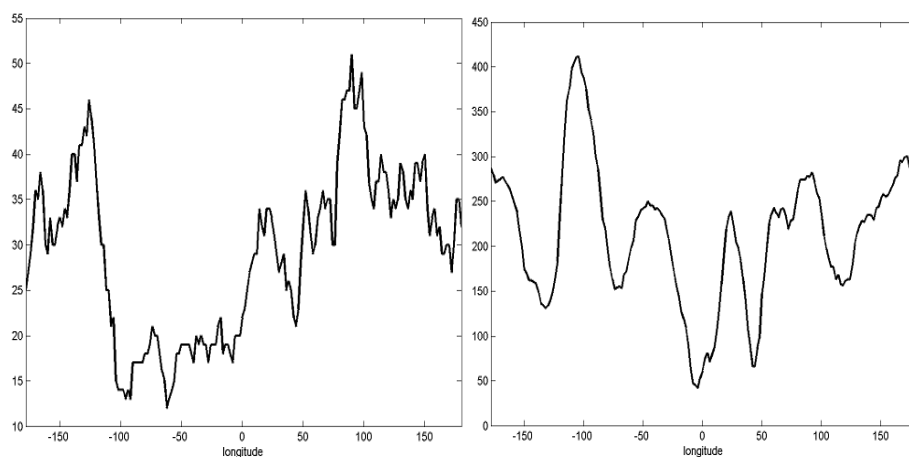


Рис. 3. Слева - количество стримеров в зависимости от долготы, справа - количество блокирований, лето, $\theta=330K$

Для базового эксперимента было проанализировано местоположение контуров поверхности. Сравнивались распределения стримеров и блокирующих ситуаций, определяемых с помощью критерия Тибальди-Молтени. [5]

Область, где наблюдаются стримеры на рассматриваемой поверхности в зимний период, лежит, в основном, в субтропических широтах. (25^0 - 50^0 с.ш.). Очень редко наблюдаются стримеры на востоке Евразии и западе Тихого океана. (рис.2, слева). В то же время в этой области наблюдается максимальная по долготе частота выполнения условий Тибальди-Молтени(ТМ). (рис. 2, справа). Коэффициент корреляции между частотой стримеров и частотой блокирующих антициклонов составляет $-0,654$. В летний период линия уровня на поверхности $330K$ находится во внетропических широтах. (рис.3). Для этих данных отрицательная корреляция не так выражена: ее коэффициент составляет $-0,216$. Выделяется область в центре Северной Америки, где в модельных данных летом формируется стационарный антициклон, и соответственно, частота выполнения

условий ТМ максимальна. В этой области также наблюдается минимум количества стримеров.

Обсуждение

Форма изолинии потенциального вихря определяется интенсивностью планетарных волн: чем больше вихревая составляющая динамических полей, тем более изрезанной эта линия является.

Поскольку в нашей работе рассматривается уровень тропопаузы, для наличия стримеров необходимо, чтобы существовало распространение волн в вертикальном направлении.

Условие распространения планетарных волн в вертикальном направлении было сформулировано в [6].

$$0 \leq \bar{u} \leq u_c \quad (1)$$

где u_c - критическая скорость, зависящая от волнового числа и стратификации атмосферы, верхняя черта обозначает осреднение по широте.

Показателем направления распространения планетарных волн является поток вихревой активности Пламба [7]. Для области 20°-50° с.ш. в зимний период зональная компонента этого потока - западная, существует минимум в районе 50°-100° в.д. Таким образом, минимум количества стримеров в районе Восточной Азии обусловлен положительной дивергенцией потока Пламба.

Для летних данных также существует корреляция количества стримеров с конвергенцией потока Пламба, хотя и в меньшей степени.

Минимумы количества стримеров в областях стационарных антициклонов могут быть связаны с тем, что в некоторой окрестности средний зональный ветер становится восточным, нарушается условие (1), и планетарные волны запираются в тропосфере.

Максимумы количества стримеров наблюдаются в западной части антициклонов, что обусловлено конвергенцией потоков Пламба.

Заключение

В работе на основе модельных данных было проанализировано число стримеров полярного вихря и их связь с атмосферными блокировками. Было оценено изменение количества стримеров при климатических изменениях.

В численном эксперименте наблюдается уменьшение количества опрокидываний контуров потенциального вихря при уменьшении количества льда в Арктике. Оно особенно значительно в эксперименте с увеличением концентрации CO₂. Это можно связать с усилением струйного течения. Однако при потеплении климата не наблюдается уменьшения количества блокирований в рассматриваемых областях [3]. Можно сделать вывод о том, что между стримерами и блокировками нет однозначной зависимости.

Распределение стримеров по долготе имеет отрицательную корреляцию с блокировками. Это связано с тем, что для оценки наличия блокирования ана-

лизируется циркуляционная картина на эквивалентно баротропном уровне, в то время как стримеры линии $Q=2PVU$ находятся в районе тропопаузы.

Анализ частоты стримеров проводился без учета того, к какому типу обрушения - антициклоническому или циклоническому, они относятся. В ряде работ было показано, что реакция крупномасштабной циркуляции атмосферы на обрушение волн зависит от того, циклоническое оно или антициклоническое. Для более детального исследования надо рассматривать отдельно стримеры, относящиеся к разным типам обрушения волн.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM – 2025 - 0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гочаков А. В., Антохина О. Ю., Крупчатников В. Н., Мартынова Ю. В. Долговременная изменчивость опрокидывания волн Россби в районе субтропического струйного течения // Метеорология и гидрология. – 2022.- № 2. - С. 5-19.
2. Volodin E. M., Mortikov E. V., Kostykin S. V., Galin V. Ya, Lykossov V. N., Gritsun A. S., Diansky N. A., Gusev A. V., Iakovlev N. G., Shestakova A. A., Emelina S. V. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2018.- V. 33. - №6.- P. 367–374.
3. Platov G., Krupchatnikov V., Gradov V., Borovko I., Volodin E. Analysis of the Northern hemisphere atmospheric circulation response to Arctic ice reduction based on simulation results. - Geosciences (Switzerland). – 2021.- № 9. - V.11. DOI: 10.3390/geosciences11090373
4. Wernli, H., and M. Sprenger. Identification and ERA-15 Climatology of Potential Vorticity Streamers and Cutoffs near the Extratropical Tropopause // J. Atmos. Sci. – 2007.- V.64. - P.1569–1586
5. Tibaldi S., Molteni F. On the Operational Predictability of Blocking // Tellus. - 1990. - 42A. - P. 343-365.
6. Charney J. G., Drazin P. G. Propagation of the planetary scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. // J. Geophys. Res. – 1961 - V.66. - P.83-109.
7. Plumb R. On the three-dimensional propagation of stationary waves. // J. Atmos. Sci. – 1985. - V.42.- P. 217-229.

© И. В. Боровко, В. Н. Крупчатников, 2025

А. В. Гаврилов¹, В. В. Малахова²

Разработка карты шельфовой криолитозоны с использованием численного моделирования: значимость геологических факторов

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

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

Аннотация. Создание карты субмаринной мерзлоты арктического шельфа с использованием численного моделирования представляет собой важную задачу для понимания состояния и динамики криогенных процессов в регионе. Рассматривается подход к составлению карты шельфовой мерзлоты, предусматривающий учет как климатической и гляциоэвстатической цикличности, так и вклада геологического развития арктического шельфа в формирование субаквальной мерзлоты. Результаты моделирования показывают, что геологические факторы играют важнейшую роль в формировании шельфовой криолитозоны. Так, для разнотипных тектонических структур различия в модельной мощности мерзлоты могут составить 230-300 м. Использование численного моделирования позволит не только получить схему распространения субаквальной мерзлоты, но и прогнозировать изменения в криолитозоне под воздействием различных факторов, таких как глобальное потепление и антропогенные воздействия.

Ключевые слова: криолитозона, субаквальная мерзлота, арктический шельф, численное моделирование

A. V. Gavrilov¹, V. V. Malakhova²

The importance of geological factors in creating a map of the shelf cryolithozone using numerical modeling

¹Lomonosov Moscow State University, M.V. Lomonosov, Moscow, Russian Federation

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

Abstract. The creation of a submarine permafrost map of the Arctic shelf using numerical modeling is an important task for understanding the state and dynamics of cryogenic processes in the region. This study proposes a methodology for mapping the shelf permafrost that incorporates the dynamics of climatic and glacioeustatic cycles, whilst also accounting for the role of geological development in the Arctic shelf, contributing to the formation of submarine permafrost. The modeling results demonstrate that geological factors play a crucial role in the formation of the shelf cryolithozone. Consequently, the variations in model permafrost thickness can reach 230-300 m, depending on the distinct tectonic structures. The employment of numerical modeling will facilitate the acquisition of a scheme depicting the distribution of subsea permafrost, in addition to the prediction of alterations in the cryolithozone in response to various factors, including global warming and anthropogenic impacts.

Keywords: cryolithozone, submarine permafrost, Arctic shelf, numerical modeling

Введение

Многолетнемерзлые породы (ММП) формировались в условиях холодного климата и гляциоэвстатических циклов [1, 2]. Задачи по созданию карт криолитозоны Арктики становятся все более актуальными в свете активизации поисково-разведочных работ на углеводородное сырье и перспектив расширения транспортного использования региона. Основные задачи картирования: 1) оценка распространения многолетнемерзлых пород; 2) оценка глубины залегания нижней границы мерзлоты (подошвы); 3) оценка глубины залегания верхней границы мерзлоты (кровли); 4) оценка вертикального строения криолитозоны.

Наличие скважин позволяет получить представление о глубине залегания кровли мерзлоты на значительной части шельфа. Например, в проливе Дм. Лаптева глубина залегания кровли мерзлоты варьируется от 10 до 20 м, а на двух участках достигает 40 м [3]. В проливе Санникова ни одна из шести скважин, имеющих глубину до 70 м, не обнаружила мерзлых пород. Тем не менее, наличие посткриогенных текстур в отложениях указывает на их предшествующее существование.

По результатам сейсмического профилирования получены фактические данные о состоянии мерзлых пород на шельфе морей Лаптевых и Восточно-Сибирского [4, 5]. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии или островном распространении мерзлоты в море Лаптевых, начиная с изобат 50-60 м. В Восточно-Сибирском море подобные признаки наблюдаются даже на меньших глубинах.

Недостаток геофизических данных на шельфе Арктики, а также отсутствие методик их интерпретации для геокриологических целей обуславливают необходимость решения указанных задач с использованием численного моделирования. Тепловое математическое моделирование позволяет учитывать различные факторы, влияющие на динамику криосферы, такие как изменение температуры воздуха, температуры и солености донных отложений, уровня моря, а также влияние антропогенных факторов. К настоящему времени на базе численного моделирования составлено и опубликовано несколько карт, картосхем и схем субмаринной криолитозоны Северного полушария или таких его крупных частей, как Восточно-Сибирский шельф [6-10]. Почти все они отражают только роль цикличности климата и батиметрии арктических шельфовых морей в ее формировании. Вклад геологических факторов, т.е. истории развития шельфа в среднем неоплейстоцене-голоцене, геологического строения литосферы мощностью порядка 5 км, остался неучтенным. Так в работах [11, 12] показано, что существование оледенения могло оказать существенное влияние на мощность мерзлого слоя острова Новая Сибирь и прилегающего шельфа. Наиболее значимо роль истории геологического развития отражена в работе [13]. В ней учтены гляциоизостатические движения, обязанные шельфовым и прибрежным плейстоценовым ледникам. Однако гляциоизостазией не исчерпывается воздействие геологических факторов, на формирование криолитозоны.

В работе представлены результаты численного моделирования шельфовой мерзлоты, демонстрирующие значение как климатической и гляциоэвстатической цикличности, так и вклада геологического развития арктического шельфа в формирование субаквальной мерзлоты.

Методы и материалы

Используется одномерная модель термофизических процессов в донных отложениях с учетом фазовых переходов между мерзлым и талым грунтом [2, 14].

Физические и теплофизические свойства пород, используемые при численном моделировании, зависят от глубины залегания и состава пород и задавались в соответствии с принятой геологической моделью. Мы предполагаем, что поры пород полностью заняты водой или льдом. Граничное условие на поверхности донных отложений определяется периодами трансгрессий-регрессий с учетом изменения уровня моря, а также существованием ледниковых условий за последние 200 тысяч лет.

Сценарий 1 составлен для сравнения результатов моделирования глубин залегания подошвы и кровли мерзлоты на шельфе морей Карского (С1-А) и Лаптевых (С1-Б). Вторая серия сценариев (С2-Б, С3-Б) предназначена для сравнения результатов моделирования для различных типов тектонических структур.

В качестве основы палеогеографического сценария для шельфа моря Лаптевых была принята палеотемпературная летопись Восточной Антарктиды. Для ледникового Баренцево-Карского шельфа учитывалось, что морские обстановки существовали во вторую половину казанцевского времени [15, 16].

Обсуждение результатов

В разделе представлены результаты численного моделирования по тестовым сценариям, которые позволяют учесть роль некоторых геологических факторов.

Моделирование осуществлено для наиболее изученного временного интервала: МИС-5е – голоцен. Его результаты в отношении Западного (Карского моря) и Восточного секторов Арктики (море Лаптевых) показывают важность вклада истории геологического развития в формирование шельфовой мерзлоты.

Так, на участках изобаты 5 м на Карском шельфе заглубление подошвы мерзлоты (200 м) по данным моделирования оказывается на 300 м меньше, чем в пределах моря Лаптевых, рис.1. Здесь его модельное значение составляет 511 м (табл.1). Величина заглубления хорошо соотносится с мощностью береговой мерзлоты по данным Геокриологической карты СССР масштаба 1:2 500 000 [17]. На Ямале и Гыдане она варьирует от 200 до 400, на Лено-Анабарском побережье - от 500 до 700 м [17]. Тогда как на модельной карте криолитозоны Северного полушария [6] в противоположность выявленным различиям подошва мерзлоты на мелководьях в восточной части морей Карского и Лаптевых приурочены к одинаковой поддонной глубине - 600-700 м.

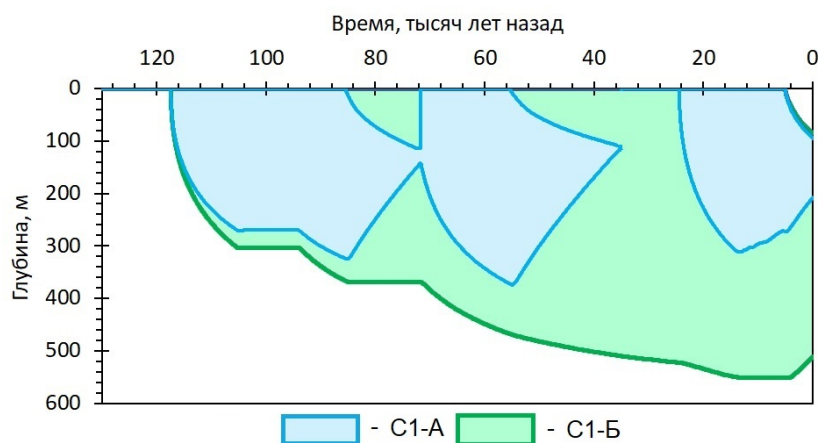


Рис. 1. Эволюция мощности мерзлых пород для северо-востока Карского (голубой контур) и Лаптевоморского (зеленый контур) шельфов. Район изобат 5 м

Глубины залегания кровли мерзлых пород по данным моделирования нарастает по мере увеличения глубин моря. На изобате 100 м на Карском шельфе ее модельные значения (107 м, табл.1) на 50 м больше, чем на море Лаптевых (52 м). Полученные значения соответствуют средним буровым данным в этих морях [3, 18].

Таблица 1

Результаты моделирования (П – подошва, К–кровля мерзлоты, м)

Сценарии	Результаты моделирования на участках изобат							
	5 м		40 м		70 м		100 м	
	П	К	П	К	П	К	П	К
С1-А	207.5	94.5	154.0	141.5	151.5	125.5	143.5	107.5
С1-Б	511.0	85.0	295.5	72.5	292.0	67.0	264.0	52.0
С2-Б	556.5	80.0	271.0	82.0	268.0	70.5	241.0	51.0
С3-Б	789.5	79.5	547.0	81.0	547.5	69.0	534.0	51.0

При оценке роли тектоники на глубину промерзания пород мощность осадочного чехла в поднятиях задавалась равной 500 и 300 м (С2-Б и С3-Б соответственно). Основным фактором предполагаемого более глубокого промерзания поднятий и щитов в сравнении с тектоническими опусканиями является повышенный коэффициент теплопроводности (λ) плотных древних пород фундамента. Моделирование показывает, что этот фактор при $\lambda = 3-3.5$ Вт/м·К «работает» только при небольшой мощности чехла (300 м, табл. 1). Глубина промерзания пород при указанных значениях λ на участках изобатах 5 м в опусканиях составляет 70 % от таковой в пределах поднятий. При уменьшении мощности чехла до 90 м мощность мерзлоты на поднятиях может в 2-2.5 раза превышать таковую в пределах опусканий [19].

Заключение

Результаты тестового моделирования показали:

1. Наиболее значимо на мощность мерзлоты (около 300 м, возможно более) влияет учет различий в истории геологического развития шельфов - Карского с одной стороны, и моря Лаптевых – с другой.

2. Превышение в мощности мерзлых толщ тектонических поднятий перед опусканиями в проведенном эксперименте оказалось более 200 м. Оно может увеличиться на участках неглубокого (100 м) залегания фундамента или его выхода на поверхность.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что геологические факторы играют важнейшую роль в формировании шельфовой криолитозоны. Их учет крайне необходим при составлении карт криолитозоны. Работа над созданием карт криолитозоны должна быть многопрофильной и включать сотрудничество между геологами, климатологами, геофизиками и специалистами в области численного моделирования. Такой комплексный подход позволит не только создать актуальные карты, но и разработать рекомендации для эффективного управления природными ресурсами региона, минимизируя негативное воздействие на экосистему Арктики. В конечном итоге, успешное осуществление данных задач будет способствовать более безопасной и устойчивой эксплуатации ресурсов и развитию транспортной инфраструктуры.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романовский Н. Н., Хуббертен Х. В., Гаврилов А. В., Елисеева А. А., Типенко Г. С., Холодов А. Л., Романовский В. Е. Эволюция мерзлых толщ и зоны стабильности гидратов газов в среднем плейстоцене-голоцене на шельфе восточной части евразийской Арктики // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 4, с. 51-64.
2. Malakhova, V. V., Eliseev, A. V. Subsea permafrost and associated methane hydrate stability zone: how long can they survive in the future? // Theor. Appl. Climatol. - 2024. - V. 155. - P. 3329–3346.
3. Фартышев А. И. Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых. – Новосибирск: Наука, 1993. – 135 с.
4. Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G. Distribution of subsea permafrost (frozen ground) in the Laptev Sea based on seismic refraction data // Arctic: Ecology and Economy. – 2023. – V. 13. – № 4. – P. 501–515. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-501-515.
5. Богоявленский В. И., Кишанков В. И., Казанин А. Г. Мерзлота и газогидраты на арктическом шельфе Восточной Сибири // ДАН. Науки и Земле, 2022, т. 507, № 1, с. 110-117.
6. Overduin P. P., Schneider von Deimling, T., Miesner et al. Submarine Permafrost Map in the Arctic Modeled Using 1-D Transient Heat Flux (SuPerMAP) // Journal of Geophysical Research Oceans. – 2019. - V. 124 (1). DOI: 10.1029 / 2018JC014675
7. Malakhova V. V. Modeling of the Arctic subsea permafrost thawing under possible climate warming // Proc. SPIE, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2023. – V. 12780. – P. 127804U. doi: 10.1117/12.2688510.

8. Кошурников А. В. Многолетнемерзлые толщи шельфа морей Российской Арктики (по данным геофизических исследований). Автореф. дисс. д.г.-м.н., М., 2023.
9. Смирнов Ю. Ю., Матвеева Т. В., Щур Н. А., Щур А. А., Бочкарев А. В. Численное моделирование субаквальных многолетнемерзлых пород на Евразийском шельфе Арктики с учетом зональности современного климата. // Криосфера Земли. 2024. – Т. XXVIII. – № 5. – С. 38-59.
10. Bukhanov B., Chuvilin E., Zhmaev M., Shakhova N., Spivak E., Dudarev O., Osadchiev A., Spasennykh M., Semiletov I. In situ bottom sediment temperatures in the Siberian Arctic seas: Current state of subsea permafrost in the Kara sea vs laptev and East Siberian seas // Marine and Petroleum Geology. 2023. . – V. 157. – 106467.
11. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Пижанкова Е. И., Попова А. А. Оценка мощности мерзлых толщ острова Новая Сибирь по данным геотермии и численного моделирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2023. – Т. 68. – № 3. DOI:10.21638/spbu07.2023.401
12. Gavrilov A., Malakhova V., Pizhankova E., Popova A. Permafrost and Gas Hydrate Stability Zone of the Glacial Part of the East-Siberian Shelf // Geosciences. 2020. – V. 10. – №12. – P. 484. DOI:10.3390/geosciences10120484
13. Creel Roges C., Mesner F., Wilkenskjeld S., Austermann J., Overduin P.P. Glacial isostatic adjustment reduces past and future Arctic subsea permafrost // Nature Communications. 2024. – V. 15. – № 3232. DOI:10.1038/s41467-024-45906-8
14. Malakhova V. V. Estimation of the subsea permafrost thickness in the Arctic Shelf // Proceedings SPIE: 24nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2018. – V. 10833. – P. 108337T.
15. Гусев Е. А., Молодьков А. Н., Стрелецкая И. Д. и др. Отложения казанцевской трансгрессии (МИС-5) Енисейского Севера // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 54. – № 4. – С. 743–757.
16. Гаврилов А. В. Типизация арктических шельфов по условиям формирования мерзлых толщ // Криосфера Земли. – 2008. – Т. XII. – № 3. – С. 69-79.
17. Геокриологическая карта СССР, м-б 1:2 500 000 / Ред. Э.Д. Ершов. М.: МГУ, геологический ф-т, 1991.
18. Куликов С. Н., Рокос С. И. Выделение массивов многолетнемерзлых пород на временных сейсмоакустических разрезах мелководных районов Печорского и Карского морей // Геофизические изыскания. – 2017. – № 3. – С. 34–42.
19. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Деревягин А. Ю., Пижанкова Е. И., Попова А. А. Мерзлые породы Восточно-Сибирского шельфа и их связь с логическими событиями среднего неоплейстоцена-голоцена // Геология морей и океанов, Т. IV. М. – 2021. – С. 36-40.

© А. В. Гаврилов, В. В. Малахова, 2025

Н. Н. Завалишин¹✉

Анализ и долгосрочный прогноз динамики расходов воды по створу Обь – Барнаул с применением модели аддитивных гармоник

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

Аннотация. В статье рассматриваются среднемесячные расходы воды за II-III кварталы по посту Обь-Барнаул. Анализ разделяется на два этапа: медленно меняющиеся и быстро меняющиеся компоненты. При исследовании низкочастотной составляющей применяется высокочастотный фильтр – сумма нормированных аномалий расходов воды и применяется кусочно-параболическая аппроксимация. Производная от полученной аппроксимации показывает медленно меняющую компоненту с помощью кусочно-линейных функций, разность которых с фактической функцией показывает быстро меняющую компоненту. К полученной разности применяется ещё один низкочастотный фильтр путем дифференцирования ряда, к которому строится Модель аддитивных гармоник. Выдается долгосрочный прогноз и оценивается его качество по набору стандартных критериев.

Ключевые слова: Обь, Барнаул, расход, анализ, модель, прогноз

N. N. Zavalishin¹✉

Analysis and long-term forecast of water discharge dynamics in the Ob-Barnaul station using the additive harmonics model

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

Abstract. The article discusses the average monthly water consumption for the II-III quarters at the Ob-Barnaul post. The analysis is divided into two stages: slow-changing and fast-changing components. When studying the low-frequency component, a high-frequency filter is used - the sum of the normalized anomalies of water flow and a piecewise parabolic approximation is applied. The derivative of the obtained approximation shows a slowly changing component using piecewise linear functions, the difference of which with the actual function shows a rapidly changing component. Another low-pass filter is applied to the resulting difference by differentiating the series to which the additive Harmonic Model is built. A long-term forecast is issued and its quality is assessed according to a set of standard criteria.

Keywords: Ob, Barnaul, consumption, analysis, model, forecast

Понимание причин изменчивости расходов воды, в частности по посту Обь-Барнаул, с последующим вычислением долгосрочного прогноза требует создания модели анализируемого процесса. В работах [1-6] рассматриваются вопросы в той или иной степени близкие к решаемым задачам в настоящей статье.

Основная гипотеза, которую положим в основание модели заключается в том, что расходы воды могут быть представлены набором гармоник с различными периодами. Методы поиска этих гармоник изложены в [7]. Обусловлены эти гармоники воздействием внешних сил или чисто земными причинами нам неважно [8-12 и др.]. Считаем, что они есть.

Пусть известен ряд $y_1, \dots, y_N$ в моменты времени $t_1, \dots, t_N$. Под этим рядом будем понимать ряд одноименных точек, например, последовательность июльских расходов воды через пост Обь-Барнаул.

Задача: построить метод прогноза на один шаг вперед: найти y_{N+1} . Так как заблаговременность такого прогноза составляет 11 месяцев, то этот прогноз по определению будет долгосрочным.

Разделим задачу на две части: моделирование низкочастотной компоненты и моделирование высокочастотной компоненты.

Чтобы найти прогноз низкочастотной компоненты, приглушим высокочастотную компоненту с помощью высокочастотного фильтра. В качестве такого фильтра возьмем сумму аномалий исходного ряда, нормированную на среднеквадратическое отклонение (СКО).

$$R_k = \sum_{j=1}^k (y_j - \bar{y})/s, \quad (1)$$

где $\bar{y}$ – среднее значение, s – СКО. Применяя Локально-климатическую модель [13] к отфильтрованному ряду (1), построим модель динамики низкочастотной компоненты, точнее говоря интеграла от низкочастотной компоненты. Производная от этой модели и даст нам искомую функцию.

Вопрос: как использовать этот результат? Прежде всего, конечно, как оценку низкочастотной компоненты. В частности, вычитая эту компоненту из исходного ряда, создадим благоприятные условия для работы с высокочастотной компонентой. Кроме того, если у нас есть уверенность, что тенденция, задаваемая ЛКМ, сохранится на $N+1$ точку, то можно выдать прогноз изменения низкочастотной компоненты на эту точку. Более того, если мы будем уверены в сохранении тенденции на серию точек, то и прогноз можно сделать на эту серию. Именно по этому алгоритму и работает Локально-климатическая модель, прогнозируя среднемесячную температуру (с детализацией по декадам) и суммы месячных осадков [14].

Рассмотрим пример. Будем анализировать июльские расходы воды через пост Обь-Барнаул. Какой интервал взять для вычисления «нормы»? В работе [15] показано, что наиболее приемлемый есть интервал 1951-1980 г.г. Результаты вычисления норм по указанному интервалу, их суммирование с нормированием на СКО, представлены в верхней части рисунка 1. В нижней части этого рисунка представлена производная, то есть аппроксимация исходного ряда кусочно-линейными функциями.

Будем предполагать, что отфильтрованный ряд есть аддитивный набор m гармоник с наложенным белым шумом ε_k :

$$Y_k = a_1 \sin(w_1 t_k) + b_1 \cos(w_1 t_k) + \dots + a_m \sin(w_m t_k) + b_m \cos(w_m t_k) + \varepsilon_k \quad (2)$$

Модель вида (2) будем называть «Модель аддитивных гармоник» или, сокращенно МАГ.

Вопрос, какой длины интервал $[t_1, t_N]$ надо выбрать? Нельзя брать очень длинный интервал времени, потому что нестационарности гидрологических процессов сделает невозможным решение поставленной задачи. Так известные явления слияния двух циклов в один или разделение одного цикла на два соседних сильно затруднит, если сделает невозможным получение эффективных оценок коэффициентов в уравнении (2). Также нельзя брать и очень короткий ряд. Для оценки одной гармоники надо оценить 3 параметра: период, амплитуду и фазу. Если в (2) ожидаемо будет $m \approx 3-5$ гармоник и на оценку каждого параметра положим, как минимум, от 3 степеней свободы и больше, то $N \approx 50-70$ точек. Поэтому будем искать коэффициенты в (2) при $N=50-70$, $m \leq 5$.

При такой постановке задачи основной акцент следует сделать на высокочастотных компонентах. Следовательно, необходимо применить к исходному ряду низкочастотный фильтр. В качестве такого возьмем производную от исходного ряда, что приглушит низкочастотные компоненты и усилит высокочастотные.

Будем считать, что низкочастотный фильтр уже применён и ряд имеет вид (2). Необходимо оценить коэффициенты в этом уравнении

Для ее решения будем применять метод Бюй-Балло [7], модифицировав его для работы не только с целочисленными периодами, а по всему спектру периодов [16]. Если, как обычно, воспользуемся методом минимальных квадратов, то такой подход нас не устроит, потому что ошибка в определении параметров гармоники будет распределена равномерно по всему ряду, а надо, чтобы она была как можно меньше в его конце для расчета прогноза. Поэтому будем работать с методом минимальных квадратов со взвешенными коэффициентами: например, коэффициенты будут меняться от нуля в начале ряда, при $k=0$, и до максимума в конце ряда, при $k=N$, по линейному закону.

$$\min \sum_{k=1}^n \lambda_k (X_k - Y_k)^2 \quad (3)$$

где $\{Y_k\}$ - представлено в (2); $\{X_k\}$ – фактические значения;
 $\lambda_k = k$ для $k=1, N$.

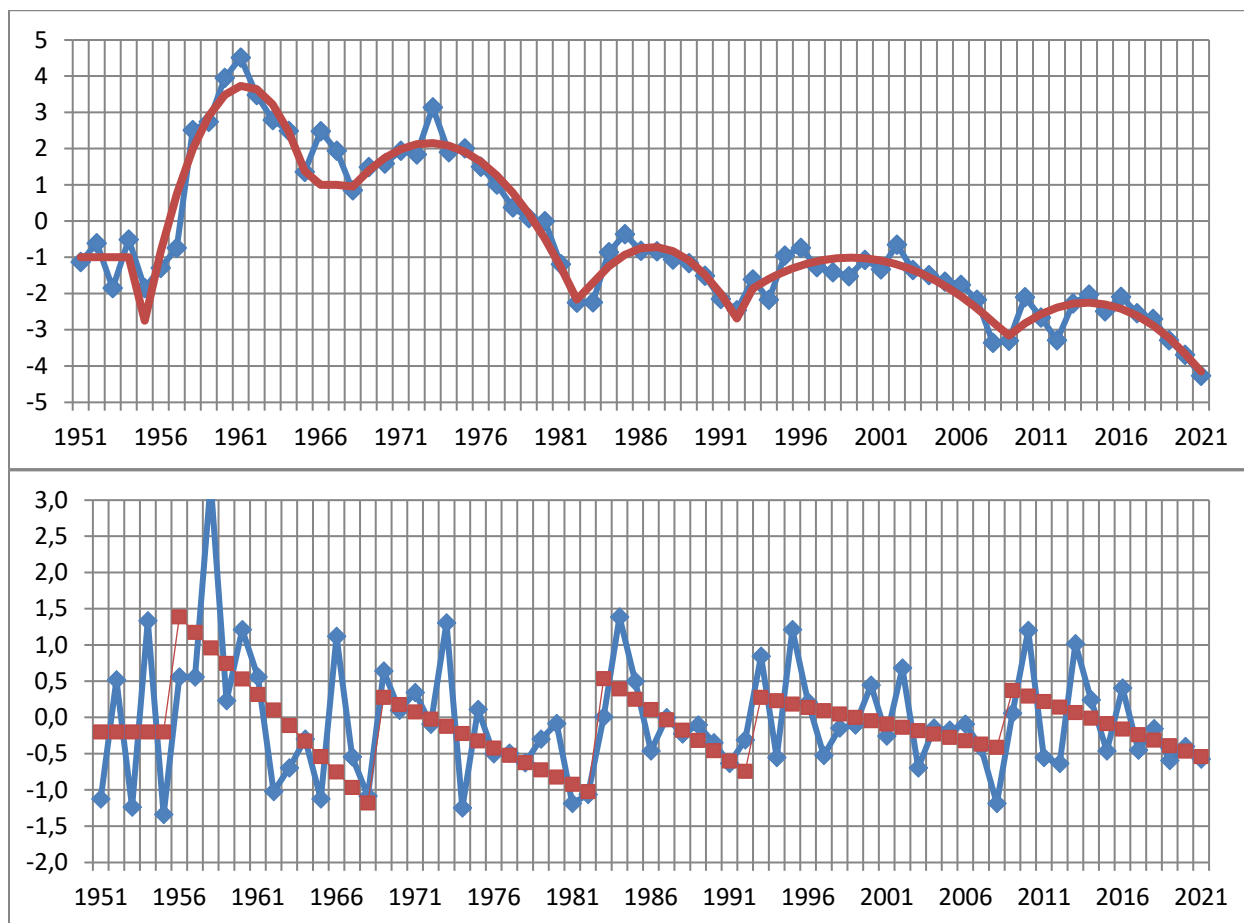


Рис. 1. Июльские расходы воды через прост Обь-Барнаул в форме: верх - сумма аномалий, нормированных на СКО с кусочно-параболической аппроксимацией: низ - аномалии, нормированные на СКО с кусочно-линейной аппроксимацией.

Пусть есть многолетний одноименный ряд месячных данных расходов воды по посту Обь-Барнаул, к примеру ряд июльских расходов воды. Применим к этому ряду технологию работы, показанную на рисунке 1. Аномалии, полученные путем вычитания из исходного ряда кусочно-линейной аппроксимации, продифференцируем и пропустим через программу [16].

В результате получим периодограмму, представленную на рисунке 2. Чётко выделяются гармоники с периодами: 2.25, 2.87, 3.70, 4.13, которые имеют амплитуды: 0.342, 0.420, 0.389, 0.256, соответственно. Какие гармоники включить в работу определяет уровень отсечения шумовой компоненты: эти четыре гармоники получаются при уровне отсечения равном 0.6. Можно попытаться опустить это уровень отсечения пониже, например, до 0.5, но тогда с большой долей вероятности мы прихватим и шумовые компоненты. Однако добавить одну, самую высокочастотную гармонику с периодом 2.06 и амплитудой 0.222 еще возможно, оставаясь в рамках введенных ограничений. Что и сделаем.

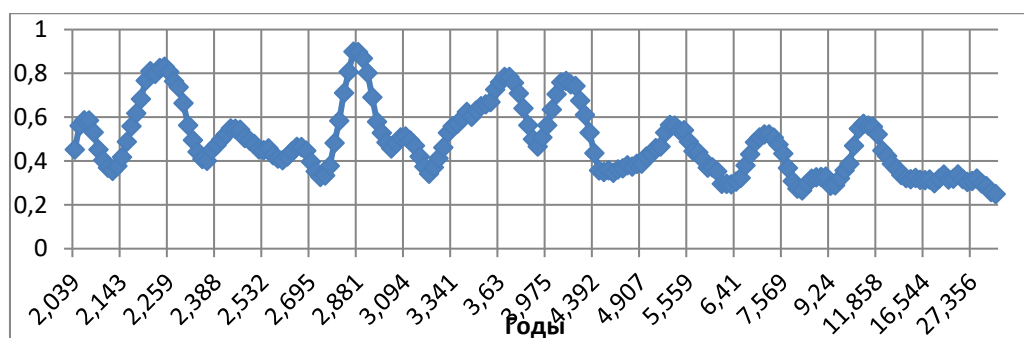


Рис. 2. Периодограмма июльских расходов воды по створу Обь-Барнаул (1971-2021гг)

На рисунке 3 показана аппроксимация нормированных на СКО аномалий июльских расходов по створу Обь-Барнаул Моделью аддитивных гармоник (5 гармоник). Критерии качества аппроксимации: остаточная дисперсия $D_{rest}=0.36$ на зависимом материале (1971-2016 года), $D_{rest}=0.41$ на независимом материале (2017-2021 года); критерий «ро» равен 0.63 и 0.60, соответственно; критерий «К» равен 0.78 и 0.40. В целом хорошие результаты по остаточной дисперсии и критерию «ро», но по критерию «К» заметная просадка на независимом материале, что, вероятно, связано с малым числом данных.

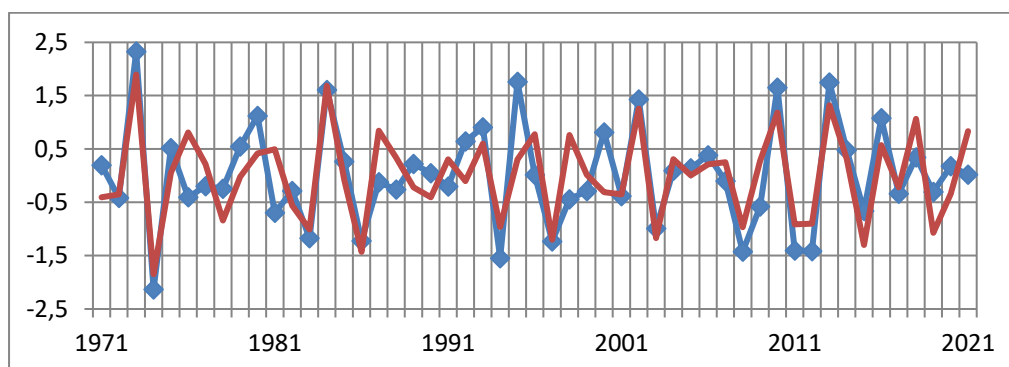


Рис. 3. Нормированные на СКО аномалии расхода воды в июле по створу Обь-Барнаул (синий) с аппроксимацией Моделью аддитивных гармоник (красный).

По изложенной схеме был выполнен расчет для каждого месяца во II-III кварталах. Результаты точности работы Модели аддитивных гармоник представлены в таблице 1, 2. Причем в таблице 1 применялся метод минимальных квадратов без подключения весов, а в таблице 2 с введением весов, как указано в (3).

Что понимается под «аномалией»? Применение Локально-климатической модели для снятия низкочастотной компоненты. Соответственно под «фактом» понимается работа с исходным рядом, без применения ЛКМ. Но, в обоих вариантах применяется еще один низкочастотный фильтр – дифференцирование ряда.

Таблица 1

**Критерии точности работы Модели аддитивных гармоник
на расходах воды по створу Обь-Барнаул**

	Критерий	Drest	ρ	K	Drest	ρ	K
Месяц	<i>Данные</i>	На зависимом (1951-2016гг)			На независимом (2017-2021гг)		
Апрель	<i>факт</i>	0.68	0.70	0.61	0.94	-0.60	0.20
	<i>аномалия</i>	0.60	0.68	0.61	0.92	-0.20	0.20
Май	<i>факт</i>	0.71	0.68	0.65	0.92	-0.20	0.60
	<i>аномалия</i>	0.69	0.71	0.59	0.62	0.20	0.60
Июнь	<i>факт</i>	0.58	0.76	0.59	0.91	-0.60	0.40
	<i>аномалия</i>	0.58	0.79	0.56	0.99	-0.20	0.40
Июль	<i>факт</i>	0.65	0.77	0.65	0.08	0.60	1.00
	<i>аномалия</i>	0.72	0.70	0.65	0.21	-0.60	0.80
Август	<i>факт</i>	0.77	0.65	0.59	0.42	0.20	0.80
	<i>аномалия</i>	0.75	0.56	0.56	0.21	0.20	0.80
Сентябрь	<i>факт</i>	0.57	0.80	0.58	0.87	0.20	0.40
	<i>аномалия</i>	0.50	0.70	0.64	1.40	0.20	0.40

Таблица 2

**Критерии точности работы Модели аддитивных гармоник с нарастающими
весами на расходах воды по створу Обь-Барнаул**

	Критерий	Drest	ρ	K	Drest	ρ	K
Месяц	<i>Данные</i>	На зависимом (1951-2016 гг)			На независимом (2017-2021 гг)		
Апрель	<i>Факт</i>	0.68	0.70	0.56	0.90	-1.0	0.20
	<i>Аномалия</i>	0.62	0.71	0.59	0.75	0.60	0.40
Май	<i>Факт</i>	0.73	0.65	0.62	0.84	0.20	0.40
	<i>Аномалия</i>	0.71	0.71	0.59	0.64	-0.20	0.60
Июнь	<i>Факт</i>	0.59	0.74	0.57	0.90	-0.60	0.40
	<i>Аномалия</i>	0.59	0.76	0.61	0.97	-0.20	0.40
Июль	<i>Факт</i>	0.67	0.73	0.61	0.09	0.20	1.00
	<i>Аномалия</i>	0.74	0.67	0.61	0.19	-0.20	0.80
Август	<i>Факт</i>	0.77	0.64	0.59	0.40	0.20	0.20
	<i>Аномалия</i>	0.76	0.56	0.56	0.20	0.20	0.20
Сентябрь	<i>Факт</i>	0.60	0.77	0.61	0.60	0.20	0.40
	<i>Аномалия</i>	0.52	0.70	0.67	1.08	0.20	0.40

Первый вопрос: есть ли какой-либо эффект от применения весов в методе минимальных квадратов? Сравнивая остаточные дисперсии Drest в таблицах 1, 2 на независимом материале получим в среднем улучшение на 8% на факте и аномалии в пользу таблицы 2. При этом значительные отличия имеют место в переходные месяцы: апрель и сентябрь.

Второй вопрос: есть ли отличие по остаточной дисперсии между фактом и аномалий на независимом материале? Здесь отличаются в пользу аномалии ме-

сяцы апрель, май и август и, соответственно, в пользу факта отличаются июнь, июль, сентябрь.

Третий вопрос: как различаются результаты на зависимом и независимом материале? Из таблицы 2 получаем, что остаточная дисперсия на зависимом материале (в среднем 0,67) почти совпадает с результатом на независимом материале (в среднем 0,63). При этом во втором квартале почти во всех месяцах остаточная дисперсия на зависимом материале меньше, чем на независимом. В третьем квартале ситуация обратная. Как это можно интерпретировать?

Фактически, независимый материал – это прогноз по МАГ на 5 лет вперед. Если найденные гармоники действительно есть в исходном ряду, то понятно, что прогноз будет успешным. Это обстоятельство объясняет успех в месяцах третьего квартала, что повлекло за собой успех в целом.

По критерию «ро» все оценки лучше на зависимом материале. По критерию «К» только июль месяц на независимом явно лучше результата на зависимом материале.

Относительно статистической значимости полученного результата судить сложно из-за малой выборки. Но у нас есть ориентир более высокого порядка: оправдываемость оперативных долгосрочных гидрометеорологических прогнозов.

Модель аддитивных гармоник применялась на долгосрочном прогнозе гидрографа притока воды в Новосибирское водохранилище на II-III кварталы с месячной и декадной детализацией. Были проведены трехлетние оперативные испытания, по результатам которых модель была внедрена в оперативную работу Гидрометцентра Западно-Сибирского УГМС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. – М.: Гидрометцентр, 2023. – 202 с.
2. Галахов В.П., Ловецкая О.В., Самойлова С.Ю., Кудишин А.В. Статистический анализ колебаний водности реки Оби у города Барнаула за 1922-2022 гг. //Известия Алтайского отделения Русского географического общества. - 2024, №4 (75). - С. 20-31.
3. Горошко Н.В. Бураков Д.А. Факторы и закономерности пространственной корреляции годового стока рек бассейна Верхней Оби. //Метеорология и гидрология. – 2007, №1. – С.101- 109.
4. Зиновьев А.Т., Галахов В.П., Кошелев К.Б. Прогнозы весеннего половодья Верхней Оби в 2015 году. //В сборнике: Безопасность и живучесть технических систем. Материалы и доклады: в 3-х томах. – 2015. – С. 196-201.
5. Зиновьев А.Т., Дьяченко А.В., Кошелев К.Б., Марусин К.В. Моделирование и наблюдения русловых процессов на реках Сибири на примере реки Обь у города Барнаула. //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. Т.4, №1. – С. 126-136.
6. Романов Л.Н., Бочкарева Е.Г., Богданова В.Ф. Гидрологический долгосрочный прогноз в условиях Новосибирского водохранилища. //Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. – 2011. - №106. - С.89-102.
7. Серебрянников М.Г. Первозванский А.А.Выявление скрытых периодичностей. – М.: Наука. 1965.

8. Завалишин Н.Н. Моделирование агрометеорологических процессов на астрометеорологической основе. //Долгосрочное прогнозирование гидрометеорологических условий. – Сборник научных трудов СО ВАСХНИЛ: Новосибирск. 1985. - С.42-47.
9. Винокуров Ю.И., Понько В.А. Геокосмические связи в прогнозировании аномалий климата и водных ресурсов. //В книге: Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Тезисы докладов XIX Международного симпозиума. - 2013. - С. 10.
10. Байдал М. Х. Частотно-циклический анализ и расчет климатических характеристик. // Климатология и сверхдолгосрочный прогноз. – Л.: 1977. - С. 47-56.
11. Шерстюков Б.Г., Исаев А.А. Метод кратной цикличности для анализа ритмов в атмосфере и сверхдолгосрочного прогнозирования погоды на примере характеристик отопительного периода в Москве. //Метеорология и гидрология. - 1999. - №8. – С.46-54.
12. Бабкин А.В. Оценка периодичностей и долгосрочный прогноз изменений уровней воды (на примере Ладожского озера и озера Веттерн). //Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2009. - № 9. - С. 5-10.
13. Завалишин Н.Н. Оценка математического ожидания метеорологических рядов кусочно-линейными функциями. //Труды ЗапСибНИГМИ. – 1990. - вып.93. - С. 12-24.
14. Завалишин Н.Н. Программа оценки математического ожидания случайного процесса программ для ЭВМ №2013617521.Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16.08.2013.
15. HansenJ., and all. Global temperature change. //Proc. Nat. Acad. Sci. - 2006. - Vol.103, No.39. - P. 14288-14293, doi:10.1073/pnas.0606291103.
16. Завалишин Н.Н. Программа аппроксимации дискретного ряда аддитивным набором периодических функций. /Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2019664582. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 08.11.2019.

© Н. Н. Завалишин, 2025

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

Адаптивная квадратурная фильтрация транспортных колебаний в задачах геолокации

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

²Институт вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kreknin98@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается проблема геоэкологического мониторинга окружающих техногенных шумов в связи с их возрастающим воздействием на социальную среду. В связи с обозначенной проблемой возникают задачи обнаружения и определения местоположения источников шумов. Для решения задач с повышенной точностью разработаны и исследованы алгоритм и программа обнаружения и определения местоположения источника на основе помехоустойчивой адаптивной квадратурной фильтрации транспортных колебаний на фоне окружающих шумов и вычисления фазовых характеристик колебаний на текущих секционированных участках входных сигналов с последующим вычислением трёхмерного вектора фаз. По получаемым текущим реализациям векторов фаз определяется азимутальное направление на источники. Выполнены численное моделирование и экспериментальное исследование предложенного подхода по оцениванию точности пеленгации.

Ключевые слова: транспортные шумы, пассивный геомониторинг, сейсмоакустические колебания, спектрально-временной анализ, квадратурная фильтрация, геолокация

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

Adaptive quadrature filtering of transport vibrations in geolocation tasks

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: kreknin98@gmail.com

Abstract. The paper considers the problem of geoecological monitoring of the surrounding man-made noises in connection with their increasing impact on the social environment. In connection with this problem, the tasks of detecting and locating noise sources arise. To solve problems with increased accuracy, an algorithm and a program for detecting and locating a source based on noise-resistant adaptive quadrature filtration of transport vibrations against ambient noise and calculating the phase characteristics of vibrations in the current sectioned sections of input signals with subsequent calculation of a three-dimensional phase vector have been developed and investigated. According to the current phase vector implementations obtained, the azimuthal direction to the sources is determined. Numerical modeling and experimental investigation of the proposed approach to estimating the accuracy of direction finding have been performed.

Keywords: transport noise, passive geomonitoring, seismic and acoustic vibrations, spectral and temporal analysis, quadrature filtering, geolocation

Введение

Проблема геоэкологического мониторинга окружающих техногенных шумов в связи с их возрастающим воздействием на социальную среду приобретает все более высокую актуальность. Этому способствуют рост автомобилизации в мире, ведение активных работ по строительству, производственная деятельность, а также проведение различных промышленных и карьерных взрывов.

Одними из основных в этой области являются задачи, связанные с обнаружением транспортных колебаний на фоне внешних шумов с последующим определением азимутального направления (пеленга) на источники сейсмоакустических колебаний. С этим связаны понятия фазовых фронтов волн и подобия сигналов, передающих информацию о лоцируемом источнике в многоканальные пространственно-распределенные системы регистрации. Подобие сигналов при этом оценивается функцией когерентности сигналов на выходах датчиков. В частности, на этих принципах базируется подход к определению пеленга на активные источники по их преобладающим спектральным составляющим шумов [1].

Другой подход к решению рассматриваемой задачи связан с теорией корреляционно-экстремальных систем (КЭС) [2], в основе которых лежит вычисление функции взаимной корреляции случайных процессов и определения координат главного экстремума этой функции, характеризующих положение лоцируемого источника. В качестве исходных при этом могут быть использованы волновые поля разной физической природы. Решение задачи предложены и в ряде других работ [3-7].

Методы и материалы

В качестве основного инструмента повышения точности авторами данной работы предлагается применение цифровой адаптивной квадратурной фильтрации полезных транспортных колебаний на фоне мешающих шумов. Процесс адаптации предполагает слежение за текущими частотными характеристиками колебаний, которые определяется режимами движения транспортного средства. Такой подход к выделению полезных транспортных колебаний на фоне шумов и определения текущих фазовых характеристик с использованием в последующем поляризационного метода построения трёхмерного эллипсоида позволяет повысить точность пеленгации подвижного источника с применением способа определения положения большой оси эллипсоида.

Рассмотрим алгоритм квадратурного накопления, используемый для выделения гармонических сигналов и измерения их параметров на фоне помех. Результат работы алгоритма квадратурного накопления состоит в получении значений амплитуды R и фазы φ гармонического сигнала [8]. Преимущество данного алгоритма перед другими алгоритмами состоит в том, что он может обрабатывать входные данные в поточном режиме реального времени.

Проанализируем математический аппарат, на основе которого построен алгоритм квадратурного накопления. Для этого представим регистрируемый сигнал в виде

$$Z_j(t)=S_j(t)+n_j(t), \quad (1)$$

где $S_j(t)=A_m \sin(\omega_0 t + \varphi_{cj})$ - входной сигнал с амплитудой A_m и начальной фазой колебаний φ_c , подлежащими оцениванию, $n_j(t)$ – шум, $j=1,2\dots$ - число каналов регистрации. Если предположить, что φ равномерно распределяется в пределах $[0,2\pi]$, а $n(t)$ – стационарный шум, то оптимальный алгоритм накопления полезного сигнала определяется статистикой вида

$$R(A, \varphi) = \sqrt{X^2(A, \varphi) + Y^2(A, \varphi)}, \quad (2)$$

здесь X и Y – квадратурные компоненты оптимального накопителя. В случае гармонического опорного сигнала с частотой ω_0

$$X(A, \varphi) = \int_0^T X(t) \sin(\omega_0 t) dt \quad (3)$$

$$Y(A, \varphi) = \int_0^T X(t) \cos(\omega_0 t) dt \quad (4)$$

Подставляя (1) в (3) и (4) и, проводя несложные вычисления, получим средние значения статистик случайных величин X и Y с точностью до постоянного множителя

$$\bar{X}(A, \varphi) \approx A_m T \cos \varphi_c \quad (5)$$

$$\bar{Y}(A, \varphi) \approx A_m T \sin \varphi_c \quad (6)$$

Тогда

$$R(A) \approx A_m T \quad (7)$$

Чтобы исключить зависимость выходной статистики R от T , необходимо в (3) и (4) выполнить интегрирование со взвешиванием вида $1/T \int_0^T$. Таким образом, выходная статистика будет пропорциональна амплитуде выходного сигнала A_m . Структура многоканального устройства накопления для этого случая представлена на рисунке 1. Из формул (5) и (6) видно, что искомая начальная фаза входного сигнала φ может быть определена в виде

$$\varphi_c = \arctg \frac{\bar{Y}(A, \varphi)}{\bar{X}(A, \varphi)} \quad (8)$$

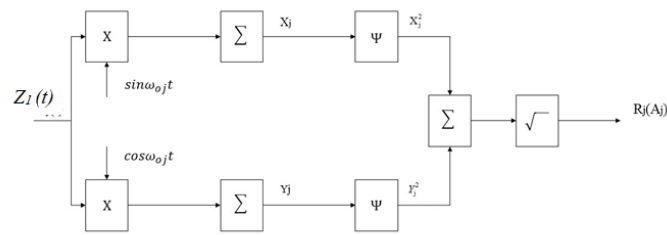


Рис. 1. – Структура 1-го канала устройства накопления гармонического сигнала на фоне помех [8]

Для использования данного алгоритма в персональных компьютерах процедура вычисления квадратур X и Y в цифровом виде может быть представлена рекуррентными соотношениями

$$X[n] = X[n-1] + \gamma(Z[n] - X[n-1]) \quad (9)$$

$$Y[n] = Y[n-1] + \gamma(Z[n] - Y[n-1]) \quad (10)$$

Здесь n - номер текущего дискретного отсчета входного сигнала $Z(t)$, γ - параметр сходимости вычисляемой статистики к оценке параметра амплитуды, определяемый в виде $\gamma = \Delta t / T$, где Δt – интервал дискретизации, T – длительность обрабатываемой реализации сигнала.

При движении объекта могут изменяться доминирующие частоты излучаемого сигнала (основные частоты, связанные с числом оборотов двигателя при разгоне автомобиля), поэтому для таких задач необходима процедура слежения за текущей основной частотой ω_0 для повышения помехоустойчивости оценивания параметров (2), (8). Для этого необходимо на каждом некотором текущем временном интервале определять ω_0 и в последующем использовать ее в качестве опорной в квадратурном фильтре (рис.1). Такая процедура может быть выполнена с использованием спектрально-временного анализа. Такой анализ предполагает, что исходный сигнал “разрезается” на временные окна равной длительности, на каждом окне проводится преобразование Фурье и определяется доминирующая (основная) частота. Это позволяет оценить эволюцию спектра во времени, оценивая при этом по максимуму спектра основную частоту в каждом временном окне. Искомая модель сигнала представляется в виде:

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

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

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

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

Результаты

Для проверки работоспособности алгоритма был проведён модельный эксперимент. Использовалась двухканальная схема обработки вида, представленного на рис.1. В качестве входных сигналов для каждого из каналов были сгенерированы смеси синусоидальных сигналов с шумом: $Z_{l,2}(t) = S(t) + n_{l,2}(t)$. Далее сигналы $Z_{l,2}$ “разрезаются” на временные окна равной длительности T , в каждом окне проводится преобразование Фурье и определяется доминирующая частота ω_0 , далее эта частота передаётся в квадратурный алгоритм как опорная частота. В результате работы квадратурного алгоритма вычисляются параметры R и φ в текущем временном окне. На основе вычисляемых множества параметров φ строится векторная диаграмма (полярограмма) в координатах φ_1, φ_2 . По полученной полярограмме рассчитывается азимутальный угол α , определяющий направление на источник колебания согласно [9].

Работа алгоритма проверялась при изменении двух параметров: размера окна накопления T (с), уровня шума n (%). Результаты работы алгоритма приведены в таблице 1. Для каждого случая приведены четыре значения – азимутальный угол по исходной полярограмме (α_1), азимутальный угол по вычисляемой полярограмме (α_2) и относительные погрешности для двух случаев соответственно (δ_1, δ_2). В данной модели истинное значение азимутального угла составляет 45° .

Таблица 1

$T \backslash n$	0%	33%	66%	100%
1с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 40.45^\circ$ $\alpha_2 = 44.78^\circ$ $\delta_1 = -10.11\%$ $\delta_2 = -0.49\%$	$\alpha_1 = 55.87^\circ$ $\alpha_2 = 45.43^\circ$ $\delta_1 = 24.15\%$ $\delta_2 = 0.97\%$	$\alpha_1 = 75.44^\circ$ $\alpha_2 = 44.94^\circ$ $\delta_1 = 67.65\%$ $\delta_2 = -0.13\%$
2с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 52.21^\circ$ $\alpha_2 = 45.2^\circ$ $\delta_1 = 16.02\%$ $\delta_2 = 0.45\%$	$\alpha_1 = 65.53^\circ$ $\alpha_2 = 45.28^\circ$ $\delta_1 = 45.61\%$ $\delta_2 = 0.62\%$	$\alpha_1 = 77.96^\circ$ $\alpha_2 = 45.05^\circ$ $\delta_1 = 73.24\%$ $\delta_2 = 0.1\%$
4с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 35.73^\circ$ $\alpha_2 = 45.15^\circ$ $\delta_1 = -20.6\%$ $\delta_2 = 0.34\%$	$\alpha_1 = 24.99^\circ$ $\alpha_2 = 45.43^\circ$ $\delta_1 = -44.48\%$ $\delta_2 = 0.96\%$	$\alpha_1 = 83.03^\circ$ $\alpha_2 = 45.11^\circ$ $\delta_1 = 84.52\%$ $\delta_2 = 0.25\%$

Для решения задачи пеленгования движущихся транспортных источников проведён модельный эксперимент с применением в качестве исходного сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигнала), имитирующего сигнал разго-

няющегося грузовика. На рисунке 2 отображено начало сигнала на 10с. Это соответствует разгону автомобиля от 0 км/ч до 45 км/ч за следующие 20с. Работа алгоритма проверялась при изменении двух параметров: размера окна накопления T (с), уровня шума n (%).

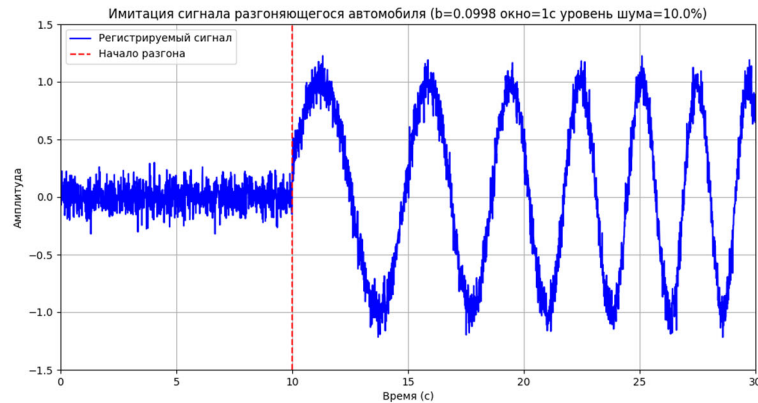
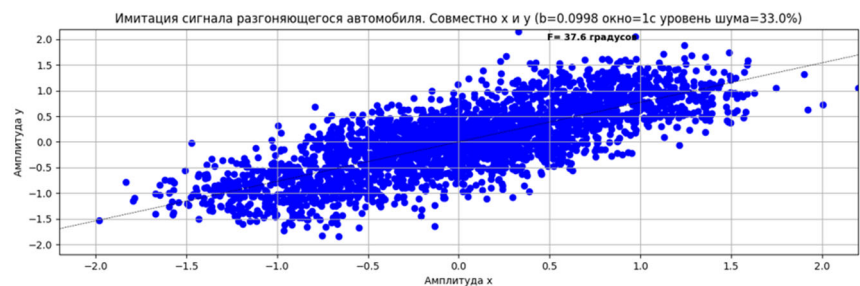
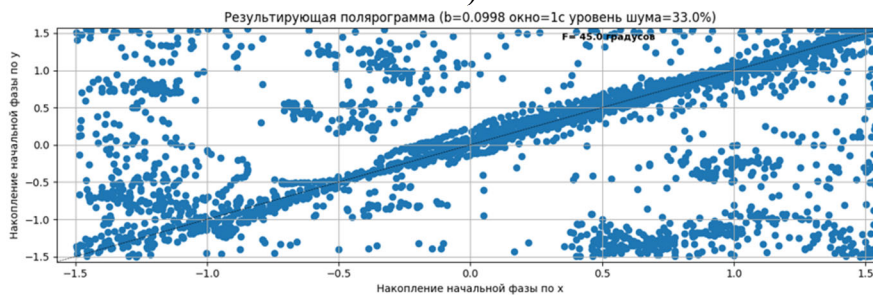


Рис. 2. Модельный сигнал при $T = 1$ с, $n = 10\%$



а)



б)

Рис. 3.а) – полярограмма входного сигнала с шумом при $T = 1$ с, $n = 33\%$;
б) – вычисленная полярограмма для того же сигнала при $T = 1$ с, $n = 33\%$

Результаты работы алгоритма приведены в таблице 2. Для каждого случая набора в виде размера временного окна (T) и уровня шума (n) приведены четыре значения – азимутальный угол по исходной полярограмме (α_1), азимутальный угол по вычисляемой полярограмме (α_2) и относительные погрешности для двух случаев соответственно (δ_1, δ_2). В данной модели истинное значение азимутального угла составляет 45° .

Таблица 2

T \ n	0%	33%	66%	100%
1с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 39.4^\circ$ $\alpha_2 = 45.1^\circ$ $\delta_1 = -12.42\%$ $\delta_2 = 0.21\%$	$\alpha_1 = 33.5^\circ$ $\alpha_2 = 45.1^\circ$ $\delta_1 = -25.53\%$ $\delta_2 = 0.11\%$	$\alpha_1 = 61.6^\circ$ $\alpha_2 = 45.1^\circ$ $\delta_1 = 36.84\%$ $\delta_2 = 0.28\%$
2с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 47.0^\circ$ $\alpha_2 = 44.9^\circ$ $\delta_1 = 4.42\%$ $\delta_2 = -0.28\%$	$\alpha_1 = 32.2^\circ$ $\alpha_2 = 45.0^\circ$ $\delta_1 = -28.51\%$ $\delta_2 = 0.11\%$	$\alpha_1 = 11.0^\circ$ $\alpha_2 = 45.2^\circ$ $\delta_1 = -75.52\%$ $\delta_2 = 0.34\%$
4с	$\alpha_1 = 45^\circ$ $\alpha_2 = 45^\circ$ $\delta_1 = 0\%$ $\delta_2 = 0\%$	$\alpha_1 = 30.9^\circ$ $\alpha_2 = 45.0^\circ$ $\delta_1 = -31.41\%$ $\delta_2 = 0.01\%$	$\alpha_1 = 36.3^\circ$ $\alpha_2 = 45.1^\circ$ $\delta_1 = -19.41\%$ $\delta_2 = 0.22\%$	$\alpha_1 = 30.7^\circ$ $\alpha_2 = 45.2^\circ$ $\delta_1 = -31.77\%$ $\delta_2 = 0.54\%$

Обсуждение

На основе проведения модельных экспериментов, связанных с изучением эффективности адаптивной квадратурной фильтрации в задачах повышения точности пеленгации транспортных объектов выполнены численные эксперименты с применением моделей сигналов. На модели смеси гармонического сигнала с шумом были получены следующие результаты: относительная погрешность оценивания азимутального угла по вычисляемой полярограмме в диапазоне уровней шумов от 0% до 100% и временных интервалов накопления от 1с до 4с не превысила 1%. В то же время погрешность оценивания азимутального угла по исходной полярограмме варьируется от 0% до 85%. На модели сигнала, имитирующем разгоняющийся автомобиль, были получены следующие результаты: относительная погрешность азимутального угла по вычисляемой полярограмме в диапазоне уровней шумов от 0% до 100% и временных интервалов накопления от 1с до 4с не превысила 1%. В то же время погрешность по исходной полярограмме варьируется от 0% до 75%. Таким образом, с ростом уровня шума и увеличением размера окна накопления точность падает точность также падает до 1%.

Заключение

В ходе работы был разработан и проверен на модельных экспериментах подход к решению задачи пеленгации подвижного транспортного объекта с помощью квадратурной адаптивной фильтрации и применением метода спектрально-поляризационной обработки. Реализация метода связана с решением последовательных задач выделения информативных частот, построением поляризационных эллипсов в координатах регистрирующего датчика с последующим расчетом пеленга на источник. Показана высокая точность пеленгования данным способом.

Эффективность созданных программно-алгоритмических средств доказана при проведении модельных экспериментов с подвижными объектами. В частности, показано что достигнутая относительная погрешность пеленгации движущегося источника с помощью поляризационного метода составляет до 1%.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карлтон П. Н., Фидлер Р. У. Определение положения источника сейсмических колебаний методом пассивного эксперимента. В кн. «Анализ и выделение сейсмических сигналов». - М.: «Мир», 1986. - С.158-175.
2. Странгуль О. Н., Тарасенко В. П. Корреляционно-экстремальные системы навигации и локации подвижных объектов // Автоматика и телемеханика, № 7, 2001.- С. 201–210.
3. Алямкин С. А., Нежевенко Е. С. Восстановление траектории движущегося объекта в сейсмической системе обнаружения при ограниченном количестве датчиков // Автоматика и телемеханика, № 2, 2014. - С. 31–39.
4. Аверьянов А. В., Глебова Г. М. Определение координат движущегося объекта сосредоточенной системой наблюдения. Автометрия. 2014. 50, №4. - С.67-73
5. Морозов Ю. В., Райфельд М. А., Спектор А. А. Обработка сейсмических сигналов для оценки траектории движущегося транспортного средства // Автометрия, № 3, 2018. - С. 32-38.
6. Sankaranayanan A. C., Zheng.Q., Chelappa R, et al. Vehicle tracking using acoustic and video sensors // Proc. of the 24th Army Science Conference. Orlando, USA, Nov.-Dec., 2004. ADM001736
7. Хайретдинов М. С., Геза Н. И., Ковалевский В. В. [и др.] Технология вибросейсмической нанометрии в проблеме активного мониторинга. Вестник НЯЦ РК. - 2012. – Вып. 2(50). - С.48-54.
8. Дворецкая, Л. Программно-технические средства обработки вибросейсмических сигналов и анализа миросейсм / Л. Г. Дворецкая, Ю. И.Родионов, М. С. Хайретдинов. – Издательство ВЦ СО РАН. – препринт. – Новосибирск, 1993. – 41 с.
9. Добродородный В. И., Копылова О. А., Хайретдинов М. С. Обнаружение и пеленгование транспортных объектов в сейсмоакустических системах наблюдения // Вестник СибГУТИ. 2023. Том 17, № 1. - С. 3–17

© А. О. Крекнин, М. С. Хайретдинов, О. А. Копылова, 2025

А. А. Михайлов^{1✉}, Х. Х. Имомназаров¹, И. К. Искандаров², И. Н. Умаров³

Исследование влияния пространственного расположения эпицентров очагов землетрясений и геологического строения среды на характер распространения сейсмических волн

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

²Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация

³Каршинский государственный университет, г. Карши, Узбекистан

e-mail: imom@omzg.sccc.ru

Аннотация. Рассматривается решение прямой динамической задачи теории упругости, которая моделирует формирование и распространение сейсмических волн от землетрясений, возникающих при тектонических процессах в нижних слоях земной коры. Поставленная задача записывается в виде динамических уравнений теории упругости в терминах компонент скоростей смещений и напряжений для двухмерной Декартовой системы координат. В настоящей статье рассматривается эффективный алгоритм решения данной прямой динамической задачи сейсмики. Численное решение задачи основано на методе комплексирования аналитического преобразования Лагерра и конечно-разностного метода. Интегральное преобразование Лагерра применяется по временной координате, аналогично спектральному преобразованию Фурье. Представлены численные результаты моделирования сейсмических волновых полей для реалистичной модели среды Байкальской рифтовой зоны. Анализируются сейсмические волновые поля, генерируемые в неоднородной упругой среде падающей волной из эпицентра землетрясения.

Ключевые слова: упругая среда, сейсмические волны, землетрясения, прямая задача, преобразование Лагерра, разностная схема

A. A. Mikhailov^{1✉}, Kh. Kh. Imomnazarov¹, I. K. Iskandarov², I. N. Umarov³

Investigate influence of a spatial arrangement of epicenters of the centers of earthquakes and geological structure of the media on the nature of distribution of seismic waves

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

²Pacific National University, Khabarovsk, the Russian Federation

³Karshi State University, Karshi, Uzbekistan

e-mail: imom@omzg.sccc.ru

Abstract. The paper considers the solution of the direct dynamic problem of elasticity theory, which models the formation and propagation of seismic waves from earthquakes occurring during tectonic processes in the lower layers of the earth's crust. The problem is written in the form of dynamic equations of elasticity theory in terms of components of displacement and stress velocities for a two-dimensional Cartesian coordinate system. This paper considers an efficient algorithm for solving this direct dynamic seismic problem. The numerical solution of the problem is based on the method of combining the analytical Laguerre transform and the finite-difference method. The integral Laguerre transform is applied along the time coordinate, similar to the spectral Fourier transform. The

numerical results of modeling seismic wave fields for a realistic model of the Baikal rift zone media are presented. Seismic wave fields generated in an inhomogeneous elastic medium by an incident wave from the earthquake epicenter are analyzed.

Keywords: elastic medium, longitudinal wave, earthquakes, direct problem, Laguerre transform, difference scheme

Введение

Регистрируемые сейсмические волны характеризуют не только очаг землетрясения, но и среду, через которую они распространяются, поэтому сейсмоакустические волновые поля являются основным носителем информации в сейсмологии. Самыми разрушительными при землетрясениях являются поверхностные волны, так как они имеют низкую частоту, большую амплитуду и внушительное время действия. Большую разрушительную силу имеют также прямые продольные сейсмические волны, возникающие в результате сдвига тектонических плит земной коры на больших по площади пространственных участках. В результате такого типа очагов землетрясений генерируется протяжённая плоская продольная волна с большой амплитудой. На амплитуду этих волн влияет не только геологическая структура в очаге землетрясения, но структура и физические свойства вышележащих слоёв среды. Точные значения характеристик сейсмических волн, регистрируемых на свободной поверхности, могут быть определены в результате численного математического моделирования. Амплитуда и форма фронта этой волны зависит от геометрии границ нижележащих слоев и акустической контрастности их физических свойств.

Математические методы, основанные на распространении сейсмических волн в акустической или идеально упругой среде, успешно применяются к различным геофизическим задачам для идентификации геологических структур.

В данной работе исследуются вопросы формирования сейсмических волновых полей от землетрясений, возникающих при тектонических процессах в нижних слоях земной коры. Для моделирования этого процесса численно решается прямая динамическая задача распространения сейсмических волн в упругой среде. Исходная система записывается в виде гиперболической системы в терминах скоростей смещений и тензора напряжений. Для численного решения поставленной задачи используется метод комплексирования аналитического преобразования Лагерра по времени и конечно-разностного метода по пространству. Данный метод решения динамических задач теории упругости был впервые рассмотрен в работах [1, 2], а затем развит и для задач вязкоупругости [3, 4]. Предлагаемый метод решения можно рассматривать как аналог известного спектрально-разностного метода на основе Фурье-преобразования, только вместо частоты ω мы имеем параметр m - степень полиномов Лагерра.

Постановка задачи

Распространение сейсмических волн в упругой среде записывается известной системой уравнений первого порядка теории упругости через взаимосвязь

компонент вектора скорости смещений и компонент тензора напряжений в декартовой системе координат (x_1, x_2) :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) + \lambda \delta_{ik} \operatorname{div} \vec{u} + \delta_{ik} F_i f(t). \quad (2)$$

Здесь δ_{ij} - символ Кронекера, $\lambda(x_1, x_2)$, $\mu(x_1, x_2)$ - упругие параметры среды, $\rho(x_1, x_2)$ - плотность среды, $\vec{u} = (u_1, u_2)$ - вектор скорости смещений, σ_{ij} - компоненты тензора напряжений, $\vec{F}(x_1, x_2) = F_1 \vec{e}_x + F_2 \vec{e}_z$ описывает пространственное распределение источника, а $f(t)$ - заданный временной сигнал в источнике. Для точечного источника типа центр давления: $F_i = \delta(x - x_0) \delta(z - z_0)$.

Задача решается при нулевых начальных данных $u_i|_{t=0} = \sigma_{ij}|_{t=0} = 0$ и граничных условиях на свободной поверхности $x_2 = 0$

$$\sigma_{12}|_{x_2=0} = \sigma_{22}|_{x_2=0} = 0. \quad (3)$$

Алгоритм решения

Для решения поставленной задачи (1)-(3) используем интегральное преобразование Лагерра по времени вида [1, 2]:

$$\vec{W}_m(x_1, x_2) = \int_0^\infty \vec{W}(x_1, x_2, t)(ht)^{-\frac{\alpha}{2}} l_m^\alpha(ht) d(ht), \quad (4)$$

с формулой обращения

$$\vec{W}(x_1, x_2, t) = (ht)^{\frac{\alpha}{2}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{m!}{(m+\alpha)!} \vec{W}_m(x_1, x_2) l_m^\alpha(ht), \quad (5)$$

где $l_m^\alpha(ht)$ - ортогональные функции Лагерра.

После применения интегрального преобразования Лагерра по времени исходная задача (1)-(3) сводится к решению системы дифференциальных уравнений только по пространственным координатам (x_1, x_2) .

$$\frac{h}{2} u_i^m + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ik}^m}{\partial x_k} = -h \sum_{n=0}^{m-1} u_i^n, \quad (6)$$

$$\frac{h}{2} \sigma_{ik}^m + \mu \left(\frac{\partial u_k^m}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i^m}{\partial x_k} \right) + \lambda \delta_{ik} \operatorname{div} \vec{u}^m = \delta_{ik} F_i f^m - h \sum_{n=0}^{m-1} \sigma_{ik}^n, \quad (7)$$

где $f^m = \int_0^\infty f(t)(ht)^{-\frac{\alpha}{2}} l_m^\alpha(ht) d(t)$.

Для дальнейшего решения задачи используется конечно-разностная аппроксимация производных на сдвинутых сетках [5] с четвертым порядком точности. Определим искомые компоненты вектора решения в следующих узлах сеток:

$$u_1(m) \in \omega x_1^i \times \omega x_2^j,$$

$$u_2(m) \in \omega x_1^{i+1/2} \times \omega x_2^{j+1/2},$$

$$\sigma_{11}(m), \sigma_{22}(m) \in \omega x_1^{i+1/2} \times \omega x_2^j,$$

$$\sigma_{12}(m) \in \omega x_1^i \times \omega x_2^{j+1/2}.$$

В результате конечно-разностной аппроксимации системы (6), (7) получим систему линейных алгебраических уравнений. Представим искомый вектор решения $\vec{W}$ в следующем виде:

$$\vec{W}(m) = (\vec{V}_0(m), \vec{V}_1(m), \dots, \vec{V}_{K+N}(m))^T, \quad \vec{V}_{i+j} = (u_1^{i,j}, u_2^{i+1/2, j+1/2}, \sigma_{11}^{i+1/2, j}, \sigma_{22}^{i+1/2, j}, \sigma_{12}^{i, j+1/2})^T.$$

Тогда, полученная в результате преобразований система линейных алгебраических уравнений в векторной форме может быть записана как:

$$(A_\Delta + \frac{h}{2} E) \vec{W}(m) = \vec{F}_\Delta(m-1)$$

Для решения данной системы линейных алгебраических уравнений используется итерационный метод сопряженных градиентов [6,7]. Преимуществом этого метода является быстрая сходимость к искомому решению, при условии хорошей обусловленности матрицы системы. Полученная в результате преобразования Лагерра матрица системы обладает этим свойством за счет введенного параметра сдвига h , специально расположенного на главной диагонали. Выбор значения параметра h даёт возможность существенно улучшать обусловленность матрицы системы. Решив систему линейных алгебраических уравнений, можно определить спектральные значения для всех компонент волнового поля $\vec{W}(m)$. Затем, воспользовавшись формулами обращения преобразования Лагерра (6), получим решение исходной задачи (1)-(3).

Численное моделирование

Для численного моделирования распространения сейсмических волн, возникающих в процессе землетрясения, были заданы две модели среды, описывающих предполагаемое строение байкальской рифтовой зоны [8]. Данная географическая область характеризуется высокой сейсмической активностью. Задаваемые для расчётов модели среды изображена на рис. 1.

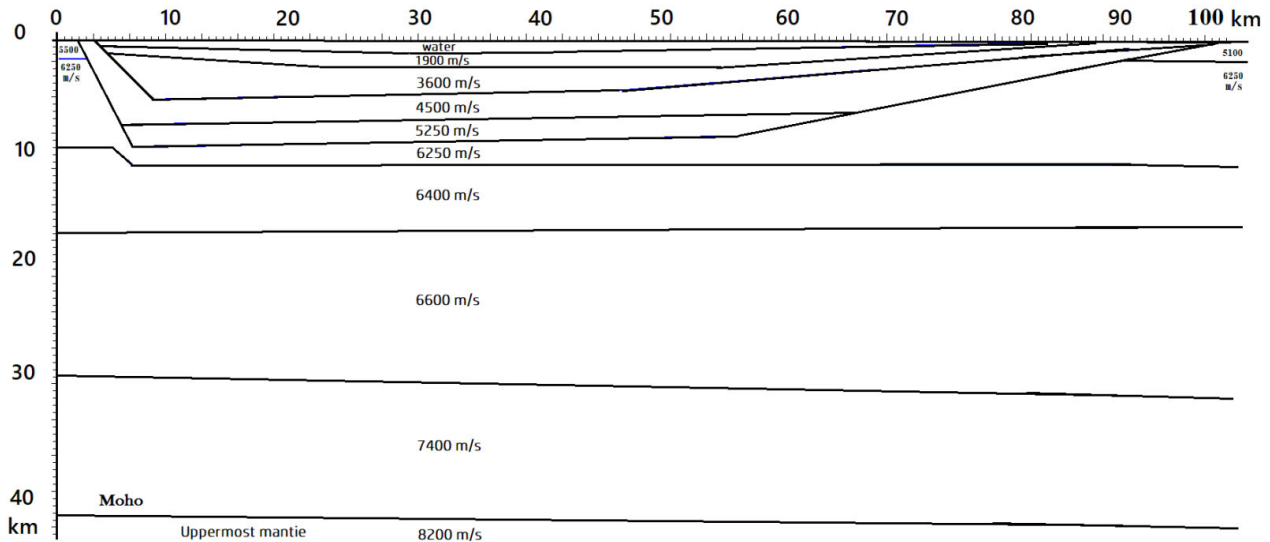


Рис 1. Модель среды

Генерация сейсмических волн в эпицентре землетрясения в результате тектонического сдвига нижних слоёв земной коры, залегающих вблизи границы земной коры и верхней мантии. Для возбуждения колебаний в очаге были заданы два источника. Первый - источник типа центр расширения, расположенный в точке с координатами $x_0 = 25$ км, $z_0 = 25$ км. Второй - источник типа вертикальная сила, расположенный в точке с координатами $x_0 = 75$ км, $z_0 = 45$ км. На рисунках 2-4 изображены мгновенные снимки волнового поля для u_z компоненты скорости смещений в моменты времени $T = 3$, $T = 6$ и $T = 12$ секунд. Временной сигнал в источниках задавался в виде импульса Пузырёва:

$$f(t) = \exp\left(-\frac{2\pi f_0(t-t_0)^2}{\gamma^2}\right) \sin(2\pi f_0(t-t_0)),$$

где $\gamma = 4$, $f_0 = 2$ Гц, $t_0 = 0.75$ сек.

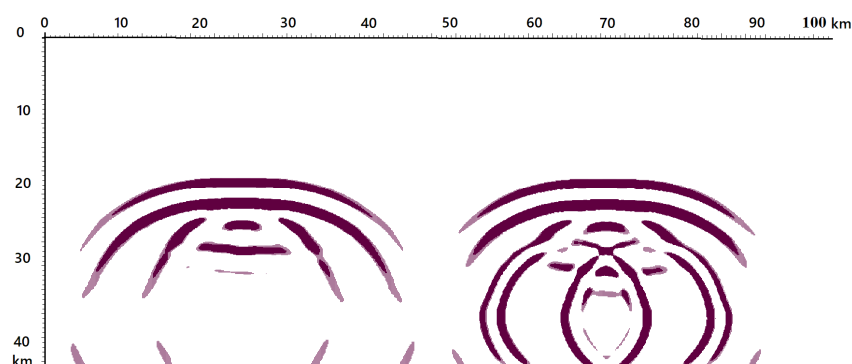


Рис. 2. Мгновенный снимок волнового поля U_Z – компоненты при $T=3$ секунды

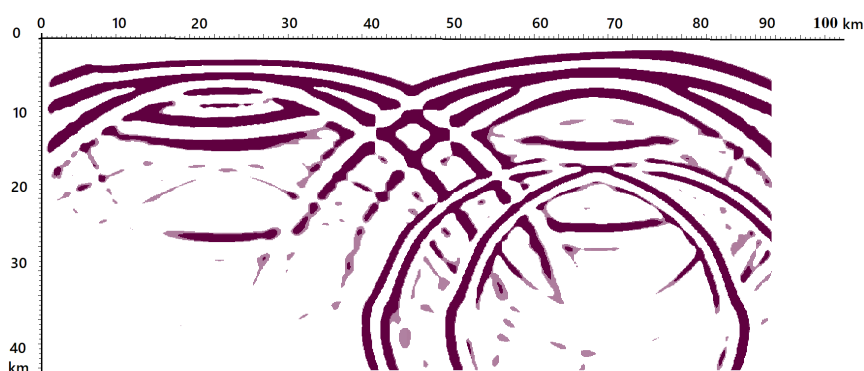


Рис 3. Мгновенный снимок волнового поля U_Z – компоненты при $T=6$ секунды

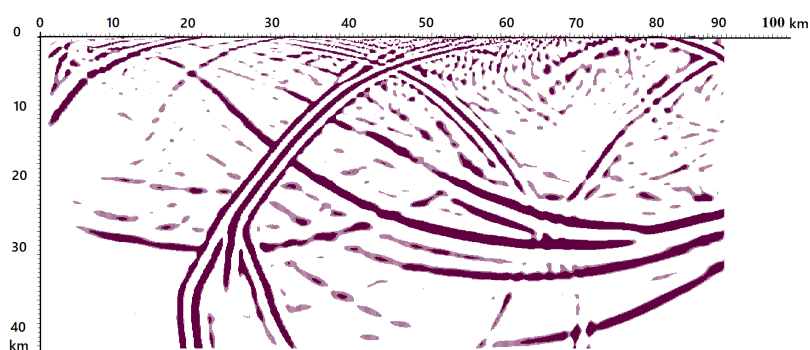


Рис. 4. Мгновенный снимок волнового поля U_Z – компоненты при $T=12$ секунды

На мгновенных снимках волнового поля, представленных на рис. 3 и рис.4, видно образование сложной интерференционной картины, вследствие отражения и преломления сейсмических волн в среде от различных границ слоёв. При рассмотрении этих снимков волнового поля видно, что в зависимости от расположения границ слоёв может формироваться фокусировка энергии различных волн на отдельных участках среды, приводящая к увеличению амплитуды упругих колебаний. При этом следует отметить, что амплитуда отражённых волн уменьшается вследствие многократно отражения от границ.

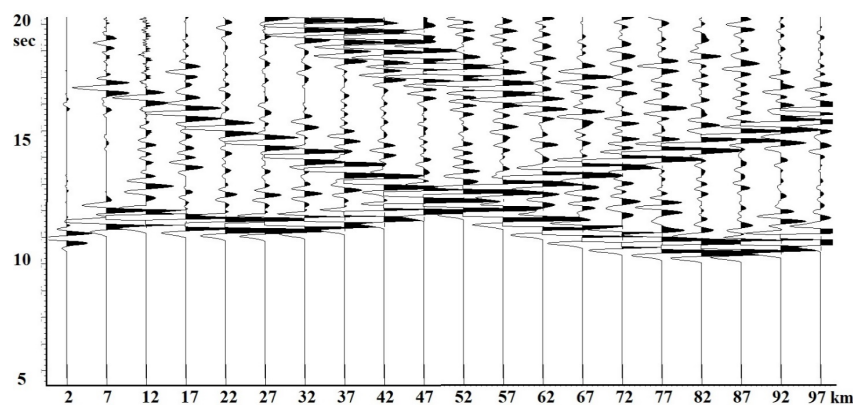


Рис. 5. Сеймотрассы для U_z компоненты регистрируемые на свободной поверхности

На представленном рисунке 5 видно, что наибольшей амплитудой обладают волны, приходящие в первых вступлениях. Амплитуда и форма фронта этой волны зависит от геометрии границ нижележащих слоев и физических свойств среды. Видно, что в моменты фокусировки амплитуда волн увеличивается и в последующих вступлениях.

Заключение

Результаты численных расчётов показывают эффективность используемого алгоритма для решения поставленной задачи моделирования распространения сейсмических волн в сложнопостроенных неоднородных средах. Анализ полученных расчётов волновой картины распространения сейсмических волн в таких средах, показывает возможность фокусировки энергии сейсмических колебаний на определённых участках среды в области происходящего землетрясения, что приводит к значительному увеличению амплитуды данных колебаний. Этот эффект, как видно из представленных результатов моделирования, зависит от геометрии строения среды и типа очага возбуждения сейсмических колебаний. Результаты моделирования возникающей волновой картины в зависимости от частоты сейсмических колебаний и геогического строения среды приводятся в работах [9,10]. Этот факт следует учитывать при строительстве технических сооружений на поверхности, а также внутри среды и производить численное моделирование возникновения возможной волновой картины в случае землетрясения. В дальнейших исследованиях предполагается изучить эффект возникновения резонанса собственных колебаний в технических сооружениях и внешних сейсмических колебаний, возбуждаемых при землетрясениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mikhailenko B. G. Spectral Laguerre method for the approximate solution of time dependent problems // Applied Mathematics Letters. 1999. № 12, 105–110.

2. Konyukh G. V., Mikhailenko B. G., Mikhailov A. A. Application of the integral Laguerre transforms for forward seismic modeling // Journal of Computational Acoustics. 2001. Vol. 9, № 4. – P. 1523-1541.
3. Mikhailenko B. G., Mikhailov A. A., Reshetova G. V. Numerical modeling of transient seismic fields in viscoelastic media based on the Laguerre spectral method // Pure appl. geophys., 2003, № 160. - P. 1207–1224.
4. Mikhailenko B. G., Mikhailov A. A., Reshetova G. V. Numerical viscoelastic modeling by the spectral Laguerre method // Geophysical Prospecting, 2003, № 51. - P. 37–48.
5. Levander A. R. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms // Geophysics. 1988. 53, 1425 – 1436.
6. Saad Y., Van der Vorst H.A. Iterative solution of linear systems in the 20th century//J. of Computational and Applied Mathematics. 2000. - № 123. - P. 1 – 33.
7. Sonneveld P. CGS, a fast Lanczos-type solver for nonsymmetric linear system// SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing. 1989. - № 10 - P. 36 – 52.
8. Nielsen C., Thybo H. Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidens from full-waveform modeling of wide-angle seismic data. Tectonophysics, 2009, Vol. 470. - №. 3. P. 298–318;
9. Mikhailov A., Imomnazarov Kh., Iskandarov I., Omonov A. Modeling then Seismic Waves Propagation While Earthquakes // AIP Conference Proceedings, 2023. - V. 3147. - 030008.
10. Имомназаров Х. Х., Михайлов А. А., Искандаров И. К. Моделирование влияния строения и физических свойств среды на характер распространения сейсмических волн от землетрясений // Математические заметки СВФУ. 2024. - Т. 31. - № 3. - С. 82-92.

© А. А. Михайлов, Х. Х. Имомназаров, И. К. Искандаров, И. Н. Умаров, 2025

С. В. Михайлюта^{1✉}, А. А. Леженин²

Проветриваемость мест размещения постов мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на территории г. Красноярска

¹Ассоциация Экологических Расследований, г. Красноярск, Российская Федерация

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

Аннотация. Выбор мест размещения постов наблюдения за состоянием и загрязнением атмосферного воздуха в условиях города является важной задачей для обеспечения репрезентативных исходных данных для управления выбросами и охраны здоровья населения. Нормативными документами определены требования к выбору таких мест. Нарушение правил выбора мест расположения стационарных постов мониторинга атмосферного воздуха может искажать информацию о загрязнении. В работе, на основе данных о повторяемости направлений и скоростей ветра на метеостанции Красноярск и на постах мониторинга внутри г. Красноярска показаны особенности трансформации ветровых потоков в городской застройке, которые необходимо учитывать при выборе мест размещения станций контроля.

Ключевые слова: мониторинг загрязнение атмосферы, ветровые потоки, измерения

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

Krasnoyarsk air pollution monitoring points, ventilation by innerurban winds

¹Ecological research and Investigation Association, Krasnoyarsk, Russian Federation

²The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: mikhailuta@gmail.com

Abstract. Location for urban air pollution monitoring stations is an important task for representative initial data for emission managing and public health protection. The low define the requirements for urbane air pollution control station locations. Violation of the rules may distort information about pollution. In this paper, by the data on the frequency of wind directions and speeds at the Krasnoyarsk weather station and at urban air pollution control stations within urban aria, the features of the urban wind transformation are shown, which must be considered for monitoring stations location.

Keywords: urban air pollution, urban wind fields, measurements

Введение

Степень загрязнения атмосферного воздуха в городе зависит от количества выбросов вредных веществ и их химического состава, от высоты, на которой осуществляются эмиссия и от климатических условий, определяющих перенос, рассеивание и трансформацию примесей [1]. При этом наблюдения за уровнем загрязнения атмосферы осуществляют на постах. В г. Красноярске с 2009 года раз-

вивается региональная сеть наблюдений за состоянием и загрязнением атмосферного воздуха (рис.1).

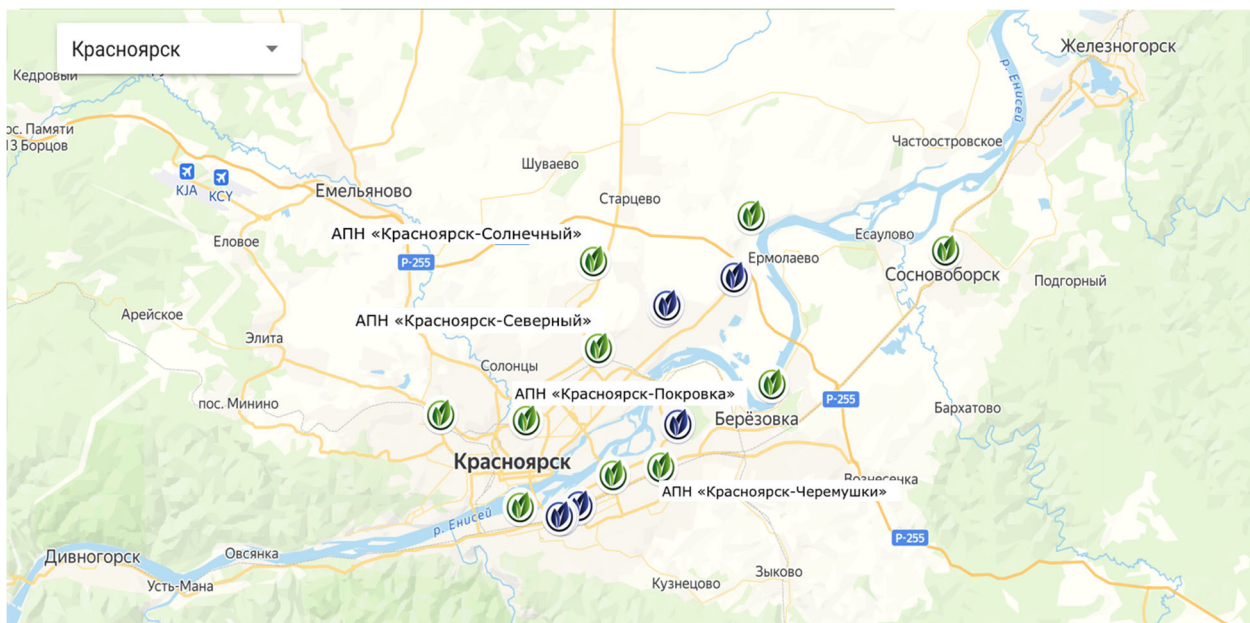


Рис. 1. Стационарные посты мониторинга Краевого государственного бюджетного учреждения «Центр реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края» [2]

Развитие наблюдательной сети за концентрациями вредных веществ в воздухе идет, преимущественно путем создания дополнительных стационарных постов. Постом наблюдения является выбранное место (точка местности), на котором размещают павильон или автомобиль, оборудованные соответствующими приборами.

Репрезентативность наблюдений за состоянием загрязнения атмосферы в городе, показывающая соответствие характеристик выборки характеристикам генеральной совокупности, существенно зависит от правильности расположения поста на обследуемой территории [1]. Репрезентативность — важнейшее свойство данных, используемых для построения аналитических выводов и управленческих решений. Независимо от того, в какой предметной области и какими методами производятся выборочные исследования, отсутствие репрезентативности выборки неминуемо приводит к некорректным результатам.

Проводимые наблюдения за загрязнением окружающей среды должны носить комплексный характер, предусматривающий определение наряду с концентрациями загрязняющих веществ в компонентах природной среды получение характеристик в пунктах наблюдений гидрометеорологических параметров, определяющих процессы переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Согласно нормативному документу [1] каждый пост независимо от категории должен размещаться на открытой, проветриваемой со всех сторон площадке.

Целью данной работы является анализ характеристик проветриваемости мест размещения ряда постов региональной сети наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха в г. Красноярске.

Методы и материалы

Оценка характеристик проветриваемости мест размещения стационарных постов мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на территории г. Красноярска выполнена по результатам сравнительного анализа с характеристиками метеостанции «Красноярск» (индекс ВМО #29570). Использовалась информация о направлениях и скоростях ветра на метеостанции и на постах мониторинга, расположенных в микрорайонах Северный, Солнечный, Покровка и Черемушки (рис.1) за период с 2017 по 2024 гг. (данные предоставлены КГБУ «Центр реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края»). Выбор этих постов наблюдений связан с характерными для большинства постов особенностями ветрового режима в местах их расположения. Анализ распределений направлений и скоростей ветра выполнялся с помощью лицензионного профессионального метеорологического программного обеспечения (программный комплекс WRPlot) [3].

Результаты

Для района расположения метеостанции Красноярск характерна «однородность» режима набегающего ветрового потока в течение всего периода рассмотрения (рис. 2).

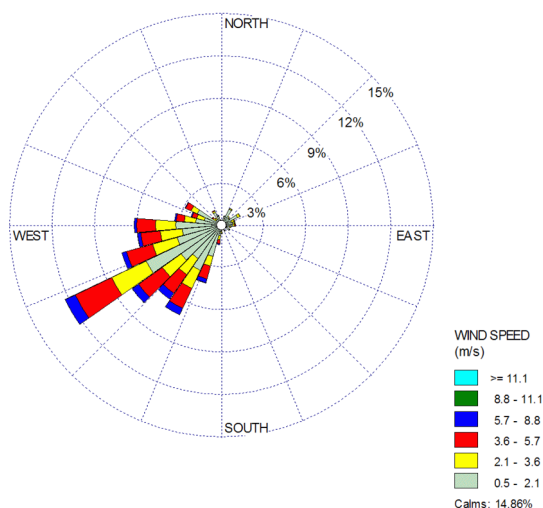


Рис. 2. Повторяемость направлений ветра на метеорологической станции Красноярск (за период 2017–2024 гг.)

Можно видеть (рис. 2), что на метеостанции «Красноярск» преобладающими являются ветра юго-западного направления. Количество штилей – менее 15%. Распределения ветров на площадках постов «Красноярск-Северный»,

«Красноярск-Солнечный», «Красноярск-Покровка» и «Красноярск-Черемушки» представлены на рис.3.

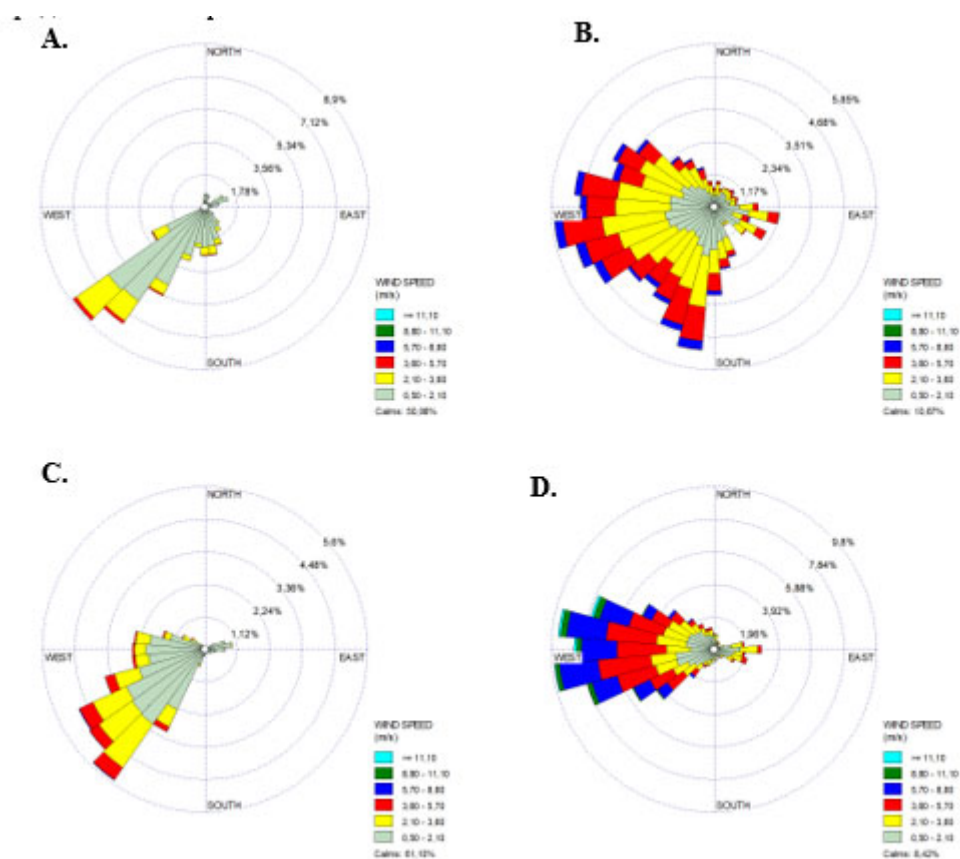


Рис.3. Повторяемость направлений ветра на постах мониторинга в микрорайонах: А. Северный. В. Солнечный. С. Черемушки. Д. Покровка (за период 2017–2024 гг.)

Анализ рис.3 показывает, что в зависимости от расположения площадки поста в городской застройке повторяемости направлений и скоростей ветра претерпевают существенные изменения по сравнению с характеристиками набегающих ветров (рис.2). Количество штилей (более 50%), наблюдаемое на площадках мониторинга в микрорайонах Северный и Черемушки показывает, что посты расположены в зонах застоя атмосферного воздуха. Деформированные окружающей застройкой розы ветров (рис.3А и рис.3С) делают невозможным перенос примесей к площадке со стороны отдельных направлений и как следствие могут «изолировать» некоторые источники выбросов, искажая их влияние на загрязнение воздуха.

Площадки постов в микрорайонах Солнечный и Покровка имеют хорошую проветриваемость, количество штилей менее 11% (рис.3В и рис.3Д). Это может обеспечивать интенсивный перенос загрязняющих веществ к посту мониторинга со стороны выделенных направлений, что требует, в свою очередь, верификации эффективных для этих постов источников и исключение ненужного сугубо се-

лективного или локального влияний (например, отдельный крупный источник или парковка автомобилей). На рис. 4 представлены розы ветров для постов в микрорайонах Покровский, Северный, Солнечный и Черемушки.

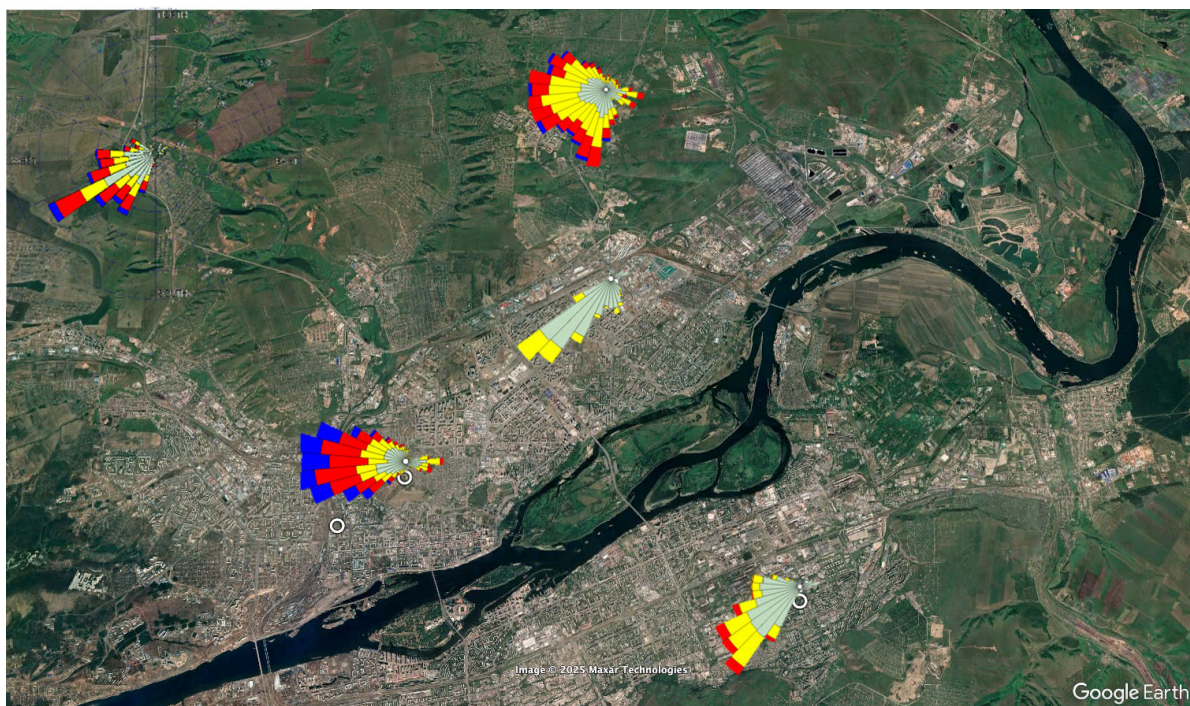


Рис.4. Повторяемость направлений ветра на площадках постов мониторинга в микрорайонах Покровский (1.), Северный (2.), Солнечный (3.) и Черемушки (4.) (левый верхний угол – роза ветров метеостанция Красноярск)

Видно (рис.4), что штилевые зоны могут существенным образом исказить информацию о загрязнение воздуха, завышать концентрации или «изолировать источники выбросов».

Обсуждение

Правильное размещение постов наблюдения за состоянием и загрязнением атмосферного воздуха имеет исключительно важное значение для получения репрезентативной и достоверной информации как о степени загрязнения воздуха, так и о влиянии на загрязнение выбросов со стороны всех эффективных источников. Нарушение условий и правил размещения постов влечет за собой искажение и потерю информации, делает невозможным поиск управленческих решений для ограничения выбросов, охраны воздушного бассейна города и защиты здоровья населения.

Анализ ветровых характеристик в местах расположения постов выявило несоответствия условиям размещения, влияющие на репрезентативность наблюдений за концентрациями вредных примесей в воздухе г. Красноярска:

- Пост «Красноярск-Северный» - расположен в окружении растительности и высоких зданий, рядом с постом организована парковка автомобилей, нару-

шена проветриваемость. Более 50% всего времени в расположении поста наблюдается безветрие (штиль), а остальное время – доминируют ветра юго-западного направления, другие направления ветра на площадке поста либо отсутствуют, либо являются редкими событиями.

– Пост «Красноярск-Солнечный» - при размещении поста не учтены планы развития городской застройки, пост размещен в аэродинамической тени высокого здания, нарушен режим тепло и влагообмена площадки поста, вблизи поста находится парковка автомобилей. Площадка этого поста «имеет хорошую продуваемость, количество штилей на площадке поста составляет менее 11%. Это может обеспечивать интенсивный перенос выбросов и вредных примесей с северо-западного, западного и юго-западного направлений.

– Пост «Красноярск-Покровка» – проветриваемость не нарушена, для площадки поста характерна «чувствительность» к переносу примесей с западного направления от высоких источников, расположенных на правом берегу и в юго-западном секторе – на левом берегу. Любая примесь, поднимающаяся от поверхности или попадающая в атмосферу западного и юго-западного секторов с наибольшей вероятностью будет переноситься через площадку этого поста.

– Пост «Красноярск-Черемушки» - повторяемость штилей на площадке поста превышает 60%, поэтому измерения на этом посту могут слабо реагировать на перенос вредных примесей от источников выбросов.

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 продуваемости и воздухообмена на подконтрольных территориях имеет исключительно важное значение для организации и адекватности наблюдений за состоянием и загрязнением атмосферного воздуха в городе, площадки постов должны получать информацию с любого направления и не способствовать застою воздуха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РД 52.04.186-89 Руководящий документ. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Госкомгидромет СССР, 1991. – 683 с.
2. <http://krasecology.ru/About/Work> (Дата обращения 18.03.25)
3. <https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/> (Дата обращения 18.03.25)

© С. В. Михайлюта, А. А. Леженин, 2025

А. В. Михеева^{1✉}

Об особенностях изменения геодинамической обстановки до и после Алтайского землетрясения

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

Аннотация. Рассмотрены особенности изменения во времени напряженно-деформированного состояния среды в очаге и за его пределами для крупнейшего в Алтае-Саянской складчатой области Алтайского землетрясения (АЗ) 27.09.2003 ($M_S=7.2$). Использован сейсмический параметр $K_{кор}$ - коэффициент парной корреляции магнитуды и крипекса для сопутствующей этому событию сейсмичности в области удаленного влияния очага. Установлено наличие отрицательной аномалии графика $K_{кор}(t)$ - до значений $K_{кор} \leq -0.7$ за 31 день до события в области подготовки АЗ, что свидетельствует об установлении режима консолидации среды в преддверие события. Исследуется возможное влияние на подготовку очага со стороны глобальных и региональных глубинных процессов, в том числе, как причины роста консолидации при подготовке сильнейших землетрясений Горного Алтая.

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

A. V. Mikheeva^{1✉}

On the features of change in the geodynamic setting before and after the 2003 Altai earthquake

¹The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: anna@omzg.ssc.ru

Abstract. The time variation features of the environment stress-strain state in the seismic focus and beyond are considered for one of the largest in the Altai-Sayan folded region of the Altai Earthquake (AE) of 27.09.2003 ($M_S=7.2$). The seismic parameter $K_{кор}$ - the coefficient of paired correlation of magnitude and creepex in the accompanying pre- and subsequent seismicity of this event is used. The presence of a negative anomaly in the $K_{кор}(t)$ graph was established - up to values of $K_{кор} \leq -0.7$ 31 days before the event in the area of AE preparation, which indicates the establishment of environment consolidation regime on the eve of this event. The possible influence of regional and global deep processes on the preparation of the earthquake focus is investigated including as the reasons for the increased environment consolidation during the preparation of the strongest earthquakes in the Altai Mountains.

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

Введение

Параметр крипекс [1], рассчитываемый по соотношению поверхностной M_S и объемной m_b магнитуд, содержит информацию о состоянии геофизической

среды как в очаге землетрясения (размером l_0 км), так и в удаленной от него (до расстояния l) зоне влияния на подготовку очага (и зоне последующей триггерной сейсмоактивности за пределами очага). Известно, что на рост крипекса влияет не только преобладание в подвижке очага квази-пластичной составляющей (по сравнению с хрупким разрушением). Но и повышение температуры окружающей среды [1], дилатансия, вызывающая поглощение высокочастотного излучения, а при росте крипекса, синхронном с ростом магнитуды землетрясений – реологическая неоднородность среды в очаге и за его пределами (т.е. отсутствие ее консолидации) [2].

Величина l зоны удаленного влияния очага оценивается на основе теории упругости и превосходит размер области очага l_0 «примерно в полтора порядка» [3]. Исходя из этой оценки, для землетрясения энергетического класса $K=17$ (т.е. магнитуды $M_S=7.2$, связанной с K эмпирической формулой ФИЦ ЕГС РАН) размер очага оценивается как $l_0=100$ км, а $l = 10^{1.5 \cdot \frac{K-11}{3}} = 1000$ км [4].

Полученной круговой областью удаленного влияния Алтайского (Чуйского) землетрясения (АЗ) 27.09.2003, $M_S=7.2$ диаметром $2 \cdot l=2000$ км охватывается практически вся сейсмоактивная территория Алтае-Саянской складчатой области (АССО), т.е. почти все (за единичными исключениями) события используемой в настоящем исследовании выборки каталогов Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН.

Данные исследуются на основе нормированного крипекса Cr_0^{cat} , представляющего собой [2, 5] величину отклонения классического крипекса $Cr_0=M_S-m_b$ [1] от тренда зависимости $Cr_0(M_S)$ по выбранному каталогу. Для Алтае-Саянского каталога полученная эмпирическая формула имеет вид:

$$Cr_0^{\text{Alt}} = M_S - m_b - 0.4503 \cdot M_S + 2.056.$$

Отметим, что ранее, в результате применения крипекса Cr_0^{cat} в сейсмо-геодинамических исследованиях различного масштаба [2, 6] было установлено, что в преддверие отдельных сильнейших землетрясений по сопровождающей их умеренной сейсмичности характерно установление высокой корреляции во времени параметров Cr_0^{cat} и M_S (т.е. синхронная или, наоборот, противофазная их динамика). Начинается эта корреляция за десятки дней до главного события и продолжается десятки и сотни дней после него [6]. Причем прямая корреляция (синхронность) характерна для большинства землетрясений рифтовых зон (геодинамический режим растяжения), а обратная (противофазная динамика) – для зон субдукции (режим сжатия). Таким образом, по знаку и величине $K_{\text{кор}}$ - коэффициента парной корреляции крипекса и магнитуды можно оценить соотношение пластичности и консолидации геофизической среды исследуемых областей.

В настоящей работе по изменению во времени значений $K_{\text{кор}}$, рассчитываемых в скользящем окне из N хронологически последовательных событий, мы будем оценивать усредненную динамику напряженно-деформированного состояния окружающей среды охватываемого ими периода сейсмичности.

Методы и материалы

Исследование проводилось в среде геоинформационной системы GIS-ENDDB [7] на основе каталога, составленного по данным сборников «Землетрясения Северной Евразии» для Алтая и Саян - по 2020 год [8]. Полученный каталог содержит выборку записей с определением пар магнитуд M_S и m_b (M_S в пересчете из энергетического класса K или локальной магнитуды M_L по формулам ФИЦ ЕГС РАН) и содержит параметры 1172 землетрясений за период с 09.06.1988 по 31.12.2020.

В данной работе также используется следующий ряд методов GIS-ENDDB: 1) выбор на карте круговой области диаметром 2000 км вокруг Алтайского землетрясения; 2) расчет для сейсмичности этой области временных графиков параметра $K_{кор}$ с использованием алгоритма расчета «с фиксированным размером скользящего временного окна» равным N точек (Метод 1) как по всей используемой выборке, так и по умеренной сейсмичности с $M_S \geq 4$, а также алгоритмом расчета $K_{кор}$ «с фиксированным в точке главного события краем окна» (Метод 2) по выборке без учета афтершоков (методы подробно описаны в [5, 6]); 3) модифицированный метод Прозорова [9] удаления афтершоков из выборки землетрясений; 4) расчет и визуализация сферических диаграмм механизмов по данным «Каталога механизмов очагов землетрясений Алтая и Саян» [8], а также гарвардскому каталогу GCMT [10].

Результаты

Изменение во времени параметра крипекс-магнитудной корреляции $K_{кор}(t)$ (рассчитанного Методом 1 по сейсмичности без учета афтершоков) в l -окрестности очага Алтайского землетрясения показывает динамику напряженно-деформированного состояния среды в виде выраженной отрицательной аномалии (красный график на рис. 1а). Это может отражать процесс консолидации среды на интервале для $K_{кор} \leq -0.7$, начинающемся за 32 дня до момента главного события и заканчивающемся через 131 суток после него (интервал отмечен зелеными точками на рис. 1а и включает 12 событий выборки). Отметим, что график $K_{кор}(t)$, рассчитанный Методом 2 (показывающим более сглаженную долгосрочную динамику параметра) для всех событий, включая афтершоки, подтверждает отрицательную, хотя и менее выраженную аномалию на этом интервале (синий цвет на рис. 1а).

С другой стороны, визуализация механизмов показывает взбросо-сдвиговый (по GCMT) или преимущественно сдвиговый (по [8]) характер подвижки Алтайского землетрясения (верхняя врезка на рис. 1б), а для всех сильнейших исторических землетрясений рассматриваемой области (рис. 1б) – преимущественную локализацию сдвиговых механизмов в районе Горного Алтая, а вокруг него - механизмов сжатия. Это говорит о том, что проявляемый аномалией графика $K_{кор}(t)$ эпизод резкого роста консолидации среды за месяц до АЗ носит не локальный, а региональный характер. Т.е. отражает свойство всей АССО, являющейся в геодинамическом отношении частью зоны субмеридионального сжа-

тия (обусловленного Индо-Евразийской коллизией [11]), осложненного, однако, за 8 лет до АЗ активизацией режима образования сдвиговых зон [12].

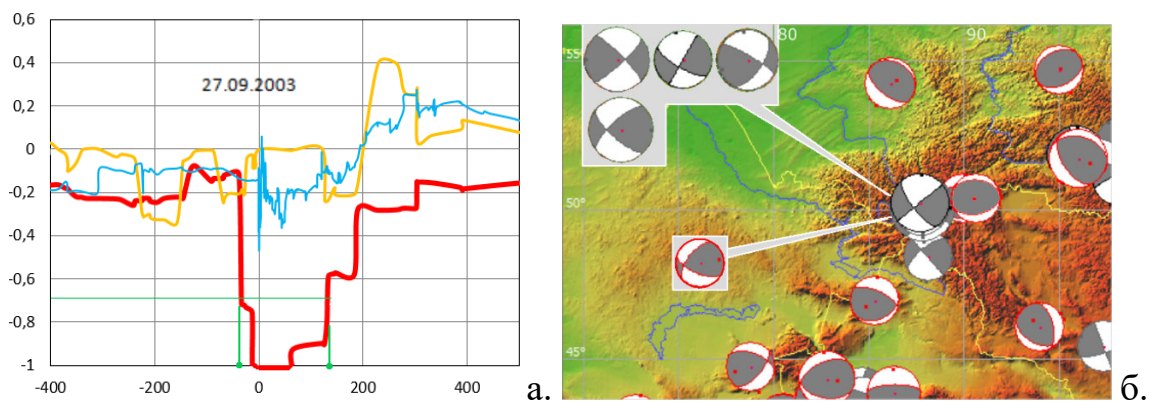


Рис. 1. Распределение параметров землетрясений АССО (афтершоки удалены): а) графики $K_{кор}(t)$ в l -окрестности очага АЗ: 27.9.2003 ($M_S=7.2$) за 400 дней до и 500 дней после события по выборке [8]: красный цвет - рассчитанный Методом 2, синий и желтый - Методом 1 для всех событий выборки ($N=50$, см. рис. 2) и для выборки без афтершоков ($N=20$), за нулевую отметку времени принято АЗ; б) карта распределения механизмов событий с $M_S \geq 5.5$ после 1995 года по GCMT [10], в верхней врезке вынесены механизмы АЗ и первых его афтершоков (через 7 часов ($M_S=6.6$) и через 4 дня ($M_S=6.9$) после главного события) по данным [8], в нижнем ряду – по [10], отдельно вынесен механизм недавнего землетрясения 15.02.2025 ($M_S=5.7$).

Сдвиговый характер АЗ в общей обстановке сжатия обычно объясняют сложным строением поля напряжений в его очаге [11, 13]. Однако, отметим, что недавнее землетрясение 15.02.2025 ($M_S=5.7$) в области очага АЗ (нижняя врезка на рис. 1б) имеет значительно большую взбросовую составляющую подвижки, что может говорить о переходе среды этой области к большей согласованности с окружающей тектонической обстановкой сжатия.

Для исследования вопроса о влиянии окружающей геотектонической обстановки на подготовку Алтайского землетрясения, рассмотрим динамику крипекс-магнитудной корреляции $K_{кор}(t)$ по всем землетрясениям и землетрясениям с $M_S \geq 4$ выборки [8] в АССО за весь исторический период (соответственно, синий и красный графики на рис. 2а). На интервале после 1995 года графики показывают периодичность, не совпадающую по фазе с периодом изменения мирового тренда $K_{кор}(t)$, полученного в [6] по данным СМТ-каталога [10] (темно-зеленая кривая на рис. 2а). Отметим, что поведение последнего на 80-90% определяется сейсмичностью в зонах субдукции, а АЗ произошло в континентальной части Южно-Азиатской глубинной мегаструктуры, включающей и сейсмофокальные зоны южно-азиатской окраины Евразии [14]. Первый график сдвинут по фазе относительно мирового почти на 6 лет в начале и центре графика (для второго графика сдвиг составляет ~ 5 лет) и менее 4 лет в его правой части. Возможно, это

говорит о запаздывании реакции сейсмоактивности АССО на динамику глобальных глубинных процессов. Отметим, что график $K_{\text{кор}}(t)$ для Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) (светло-зеленая кривая на рис. 2а) проявляет полную синхронность с мировым трендом. Это объясняется прямой связью геодинамики БРЗ с тихоокеанскими зонами субдукции, периодическая (возможно, связанная с ротационной геотектоникой) активизация которых сопровождается эпизодами отодвигания Амурской плиты от Евразии, вызывая растяжение и сбросовые подвижки в БРЗ.

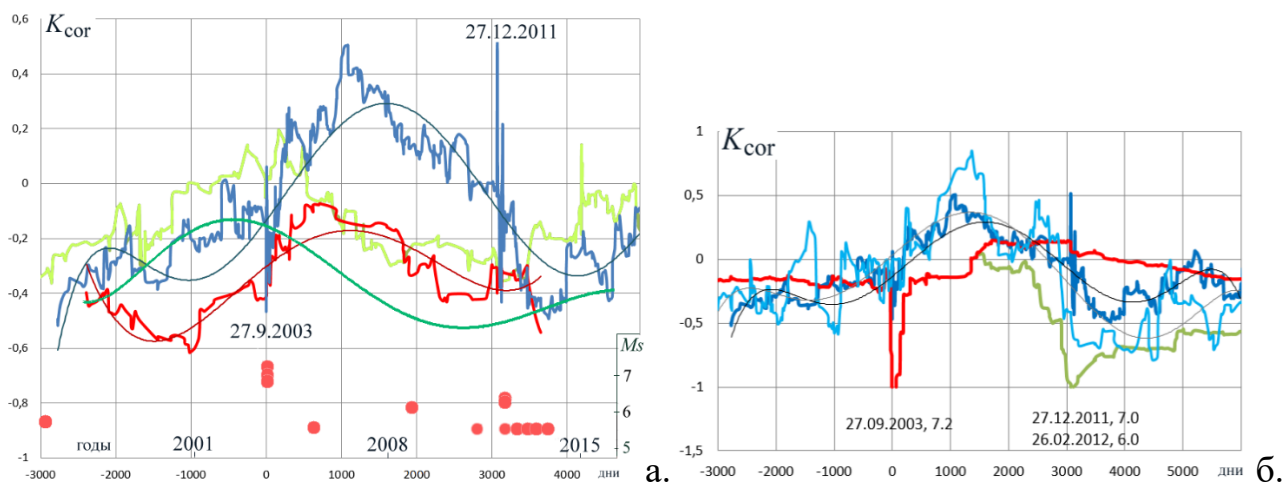


Рис. 2. Графики $K_{\text{кор}}(t)$ (Метод 2, $N=50$) в l -окрестности очага Алтайского землетрясения за весь исторический период по каталогу [8]: а) синий цвет - для всех событий, красный – для $M_s \geq 4$, светло-зеленый – по БРЗ для $M_s \geq 4$, темно-зеленый - для глобальной сейсмичности по каталогу GСMT; б) синий цвет – для всех событий, светло-синий – без афтершоков, красный и зеленый – $K_{\text{кор}}(t)$ (Метод 1) для двух сильнейших землетрясений АССО: 27.9.2003 и 27.12.2011.

Однако большее запаздывание по фазе тренда АССО в начале графика позволяет предположить временный, связанный с особенностями сейсмо-геодинамического режима региона характер его несогласованности с мировым. Это предположение подтверждается, например, по временному (рис. 3б) изменению соотношения типов механизмов «Внутриазиатского» [14] горного пояса (фрагмент которого активизировался за неделю до АЗ в виде Чуйского кластера [15] (черная линия на рис. 3а)). За 8 лет до АЗ на графике (рис. 3б) отмечается установление здесь геодинамического режима образования сдвиговых зон, а начиная с 2003 года - его быстрая смена режимом с преобладанием взбросовой составляющей.

Что касается возможного геодинамического воздействия со стороны Индо-Евразийской коллизии, то здесь также наблюдается временное отставание реакции сейсмической активности Алтая. Например, 2-годовая задержка его отклика на перераспределение поля напряжений в результате крупнейшего северо-тибетского землетрясения на разломе Куньлунь: 14.11.2001, $M_s=8.1$.

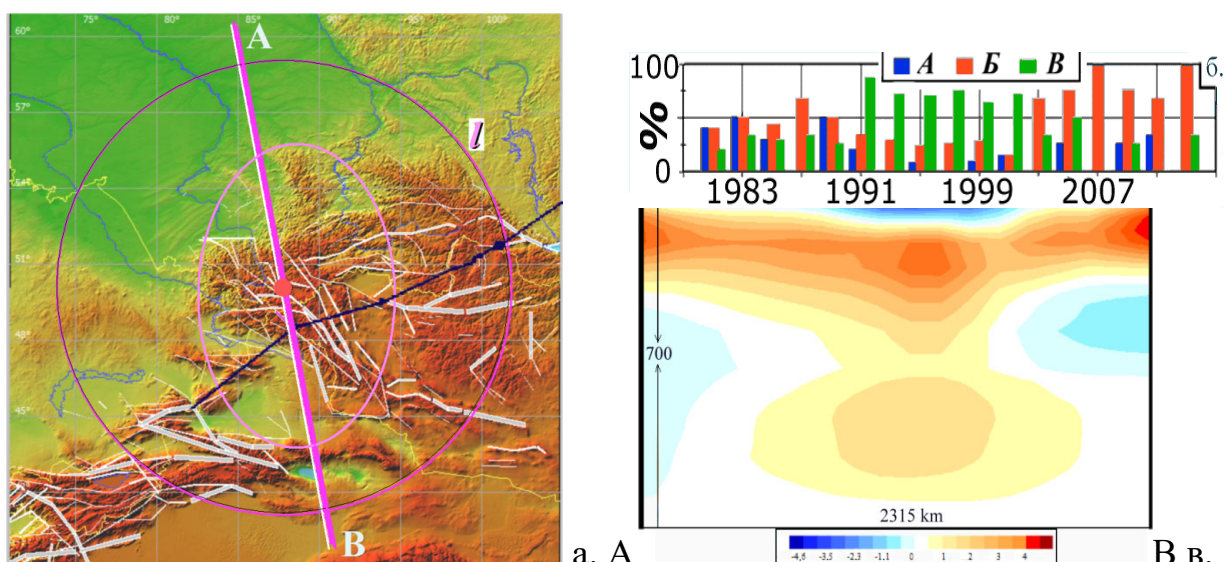


Рис. 3. Карта тектонических зон (серые линии) по [16] в l -окрестности очага АЗ (а) и томографический разрез (в) по профилю АВ: б) соотношение в % типов механизмов «Внутриазиатского» сейсмолинеамента [14] по 2-годовым интервалам: А - сбросы, Б - взбросы, В – сдвиги; в) шкала скорости поперечной волны S_V в % к базовой (по данным 3D-модели сейсмоскоростной томографии от [17]), глубина разреза 700 км. Получено в системе GIS-ENDDB.

Как показывает численное моделирование [13], «при растягивающих напряжениях в районе разлома Куньлунь в районе Горного Алтая деформации были сжимающими». Они могли проявиться в слабой сейсмичности АССО по минимуму тренда графика $K_{\text{КОР}}(t)$ в 2001г, построенному с учетом событий с $M_S < 4$ (синяя кривая на рис. 2а). При этом, как показано в [13], по умеренной сейсмичности без учета афтершоков в Горном Алтае наблюдалось годовое затишье, что говорит о возможном особом состоянии его среды (например, связанном с подготовкой АЗ) и «запертом» состоянии его разломов.

Максимальное отклонение по фазе алтайского тренда $K_{\text{КОР}}(t)$ от мирового приходится на период подготовки не только АЗ, но и другого крупного землетрясения АССО: 27.12.2011, $M_S = 6.8$ (рис. 2б), благодаря аномально высокому максимуму тренда графика между этими двумя событиями (рис. 2а), по-видимому, отмечающему повышенную реологическую неоднородность среды в АССО в 2004-2008гг. Более отчетливо этот максимум выражен (достигая значений очень высокой корреляции - $K_{\text{КОР}} = 0.81$) на графике, построенном без учета афтершоков (светло-синяя кривая на рис. 2б), что исключает влияние на рост крипекса изменений в очаге в результате АЗ, например, связанных с «деформационным разогревом» среды [5].

Тем не менее, все крупные землетрясения АССО с 1995 по 2016 годы с $M_S \geq 5.5$ (кроме самого Алтайского события) приходятся (красные точки на рис. 1а) на отрицательный полупериод мирового тренда $K_{\text{КОР}}(t)$, то есть, очевидно, приурочены к эпизодам глобального геотектонического сжатия, а не растяжения.

Это свидетельствует о восприимчивости среды АССО к глобальному сжимающему «энергонасыщению» не смотря на региональную неоднородность этой области или наличие других (вероятно, ограниченных по времени) факторов, повышающих крипекс её сейсмичности.

Обсуждение

Наличие отрицательных аномалий графиков $K_{\text{КОР}}(t)$ (Метод 1) до $K_{\text{КОР}} \leq -0.7$ в областях подготовки двух крупнейших землетрясений АССО свидетельствует о резком росте консолидации среды в преддверие этих событий. Этот режим начинается для них, соответственно, за 32 и 133 дня до главного события и сохраняется в течение нескольких месяцев и даже лет после землетрясений: для АЗ - 131 день, а для землетрясения 27.12.2011 ($M_s=6.8$) - 737 дней. Последний интервал охватывает целую серию сильных толчков: с $M_s=6.1$ - 26.02.2012 и с $M_s=5.5$: 26.02.2012, 06.06.2012, 30.07.2012, 03.10.2012, 24.01.2013, 18.06.2013.

Фазовая несогласованность периодичности графиков $K_{\text{КОР}}(t)$ (Метод 2, $N=50$ точек) по АССО и по всему миру говорит о неоднородности блоковой среды АССО, запертом состоянии её разломов или зависимости от некоторых региональных геодинамических факторов, понижающих или повышающих крипекс. Региональным фактором понижения крипекса в 2011 году может быть влияние эпизода активизации Индо-Евразийской коллизии, а фактором его высоких значений в 2004-2008гг (между двумя сильнейшими событиями) – ростом неоднородности, возможно, вызванной глубинными процессами АССО.

Обособленное и сложное геодинамическое строение Алтае-Саянского региона подтверждается геоданными системы GIS-ENDDB (рис. 3). Это и отличающаяся от окружающих коллизионных структур субширотного простираия, ССЗ-ЮЮВ ориентация линейно-доменных структур (по [16]) Горного Алтая (обведены розовым овалом на рис. 3а). А также локализованная здесь высокоплотностная структура глубинного погружения литосферы (возможно, сформированная на раннем островодужном этапе развития АССО), выявляемая по томографическому разрезу GIS-ENDDB (рис. 3в) и, вероятно, вносящая эндогенную составляющую в процесс расчленения растущего вдоль Центрально-Азиатского складчатого пояса орогена.

Заключение

С помощью параметра крипекс в области удаленного влияния очага Алтайского землетрясения удалось выявить не только общую закономерность изменения упруго-пластичного состояния среды (её консолидацию) во время крупнейших землетрясений, но и особенности развития Алтайского региона. В частности, несоответствие изменения коэффициента корреляции магнитуды и крипекса Алтае-Саянской складчатой области обнаруженным ранее периодическим изменениям этого параметра в глобальном масштабе, очевидно, связанное с обособленным и сложным строением региона.

Выполнено в рамках госзадания ИВМиМГ СО РАН № FWNM-2025-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каверина А. Н., Прозоров А. Г. Вариации крипекса в зависимости от типа тектонических структур и механизма очага: статистический анализ // Геодинамика и прогноз землетрясений. – М.: Наука, 1994. – С. 85–93.
2. Михеева А. В. О влиянии предполагаемого глобального глубинного разлома на сильные землетрясения // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 4. – 52–64.
3. 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.
4. Mikheeva A. V. On the possible relationship between remote seismic activations and strong earthquakes in southeast regions of Eurasia and adjacent seismic focal zones // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Math Modeling in Geoph. – 2024. – V. 26 – P. 17–27.
5. 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.
6. Михеева А. В. Распределение параметра крипекс-магнитудной корреляции для сейсмичности больших глубин в контексте глобальной тектоники // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 4. – 53–64.
7. Vazhenin A., Mikheeva A., Dyadkov P., Marchuk An. The software using digital databases and GIS interface for detecting geodynamic structures // New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques. – IOS Press, 2017. – P. 576–592.
8. Землетрясения Северной Евразии, 1992 год ... 2020 год. / Под ред. Старовойт О.Е. – Обнинск, ГС РАН, 1998–2024гг.
9. Dyadkov P. G., Mikheeva A. V. The expert earthquake database (EEDB) for seismic-geodynamic research // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics. – 2010. – V. 13. – P. 15–30.
10. Global CMT Catalog. [Электронный ресурс]. – Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA. – 2025. – URL: <http://www.globalcmt.org>.
11. Гольдин С. В., Кучай О. А. Сейсмотектонические деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // Физическая мезомеханика. – 2008. – №1. – С. 5–13.
12. Новиков И. С., Дядьков П. Г., Козлова М. П., Мамедов Г. М., Михеева А. В. [и др.] Неотектоника и сейсмичность западной части Алтае-Саянской горной области, Джунгарской впадины и Тянь-Шаня // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 12. – С. 1802–1814.
13. Дядьков П. Г., Назаров Л. А., Назарова Л. А., Михеева А. В., Кузнецова Ю. М. Возможное влияние землетрясений в Северном Тибете (2001 г.) и близ о. Хоккайдо (2003 г.) на процесс подготовки Алтайского землетрясения 2003 года // Физическая мезомеханика. – 2006. – №1. – С. 67–72.
14. Михеева А. В. Южно-Азиатская мегаструктура по данным геоинформационной системы GIS-ENDDB // Геоинформатика. – 2018. – № 4. – С. 2–13.
15. Михеева А. В. Программно-алгоритмический инструментарий... [Электронный ресурс]. – Новосибирск, ИСИ. – 2025. – URL: www.iis.nsk.su/files/abstract/pdf/miheeva.pdf
16. Ulomov V. I. Earthquake Source Zones of Northern Eurasia. [Электронный ресурс] / Editor-in-Chief V.I. Ulomov. – 2000. – URL: www.seismo.ethz.ch/static/gshap/neurasia/.
17. Schaeffer A. J., Lebedev S. I. Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone / A.J. Schaeffer // Geophysical Journal International. – 2013. – V. 194. – P. 417–449.

© А. В. Михеева, 2025

А. М. Осипова¹✉, А. А. Якименко^{1,2}

Оценка влияния погодных условий на погрешность локализации акустического источника

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 исследуется влияние погодных условий на погрешность локализации акустического источника с использованием метода TDOA (Time Difference of Arrival). Рассматриваются такие факторы, как температура воздуха, скорость и направление ветра, которые влияют на скорость распространения звука и, как следствие, вносят погрешность в определение координат акустического источника. Для оценки воздействия этих факторов разработано программное обеспечение, включающее клиентскую часть на основе web-технологий и серверную часть на Python. Проведены эксперименты в различных условиях: без учета погодных параметров, с учетом температуры, скорости и направления ветра, а также их комбинаций. Результаты показали, что наибольшие отклонения наблюдаются при сильном ветре (32 м/с) и низкой температуре (-40°C), что подчеркивает необходимость комплексного учета метеорологических данных в алгоритмах акустической локализации. Исследование служит основой для дальнейшего совершенствования методов учета внешних факторов в системах акустической локализации.

Ключевые слова: погодные факторы, скорость распространения звука, локализация акустического источника

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

Assessment of the influence of weather conditions on the localization error of an acoustic source

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. The article investigates the impact of weather conditions on the localization error of an acoustic source using the TDOA (Time Difference of Arrival) method. Factors such as air temperature, wind speed, and wind direction are considered, as they alter the speed of sound propagation and consequently introduce errors in determining the coordinates of the acoustic source. To assess the influence of these factors, software was developed, including a client-side web-based interface and a server-side component written in Python. Experiments were conducted under various conditions: without accounting for weather parameters, with consideration of temperature, wind speed and direction, as well as their combinations. The results showed that the greatest deviations occurred under strong wind conditions (32 m/s) and low temperatures (-40°C), highlighting the necessity of comprehensively accounting for meteorological data in acoustic localization algorithms.

This research provides a foundation for further improvement of methods for incorporating external factors into acoustic localization systems.

Keywords: weather factors, speed of sound propagation, acoustic source localization

Введение

Современные города – это сложные акустические среды с множеством источников шума, что затрудняет локализацию акустических источников. Звук отражается, поглощается и искажается под действием среды, например, ветра, что повышает погрешность расчётов [1]. Для точной локализации необходимо учитывать внешние условия. С развитием технологий область применения акустической локализации охватывает наблюдение, робототехнику, транспорт и экологию [1].

Под локализацией звукового источника понимается определение его пространственного положения на основе параметров, измеряемых с помощью нескольких микрофонов, таких как время прихода сигнала (TDOA), разность фаз (PDOA) или разница частот прибытия (FDOA) [2]. Наиболее точные и распространённые методы основываются на анализе временных характеристик сигнала, так как они менее подвержены влиянию амплитудных искажений и внешних шумов.

Несмотря на активное развитие области, многие из них предполагают идеальные условия распространения звука – без учета погодных условий или с учетом только одного параметра. Однако в реальных условиях на распространение звукового сигнала существенно влияет несколько факторов. Их игнорирование может приводить к значительным погрешностям в определении местоположения источника.

В работе исследуется влияние погодных условий – температуры и скорости ветра – на погрешность акустической локализации. Для этого разработан программный прототип и проведены испытания в разных метеоусловиях. Результаты позволили выявить ключевые факторы среды и оценить их влияние, что станет основой для улучшения методов учёта внешних условий.

Методы и материалы

Для локализации источника звука используется метод TDOA (Time Difference of Arrival) [3], основанный на разнице времени прихода сигнала к микрофонам. Это позволяет определить направление и координаты источника при наличии трёх и более приёмников. Метод отличается высокой точностью и устойчивостью к шуму, так как опирается на временные характеристики, а не амплитуду или фазу. Также TDOA не требует знания момента начала сигнала, что удобно для работы в реальном времени и в шумной среде. Временную задержку между двумя приёмниками можно выразить 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 и j приемниками, (x, y) – координаты источника звука; (x_i, y_i) – координаты i -го микрофона; v_i – скорость звука для i -го микрофона; (x_j, y_j) – координаты j -го микрофона; C_j – скорость звука для j -го микрофона.

Скорость распространения звука сильно зависит от погодных условий. В исследовании отмечают такие параметры как температура и ветер[4].

Формула Лапласа[5] используется для расчета скорости распространения звука в воздухе с учетом температуры. Она выражается следующим образом:

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

где c – скорость звука, γ – коэффициент адиабаты (для воздуха примерно 1.4), R – Универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура в Кельвинах и M – молярная масса воздуха.

Учет влияния ветра на скорость распространения звука осуществляется с помощью поправки, учитывающей направление и скорость воздушного потока относительно направления звуковой волны[6]. Эффективная скорость звука при наличии ветра 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 направлении распространения, C – скорость распространения звука в неподвижном воздухе, $v_{\text{ветра}}$ – скорость ветра, $\theta_{\text{ветра}}$ – направление ветра, $\theta_{\text{звука}}$ – направление распространения звука. В работе в качестве скорости распространения звука в неподвижном воздухе используется скорость, полученная по формуле Лапласа.

Для проведения экспериментов разработано программное обеспечение, архитектура которого показана на рисунке 1.

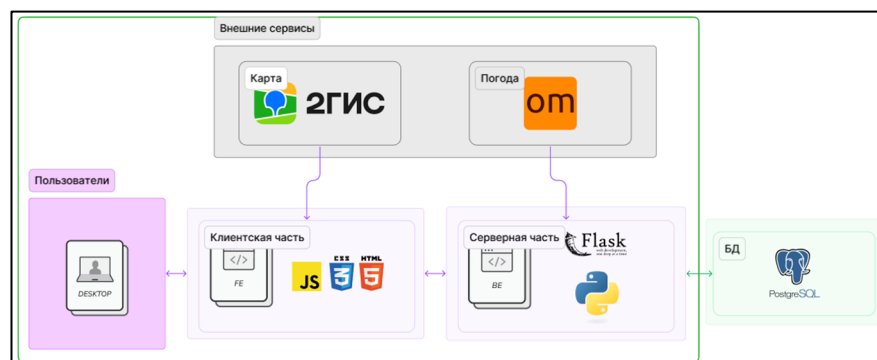


Рис. 1. Архитектура программного обеспечения

Клиентская часть реализована в виде web-приложения с использованием js, css и html. С помощью 2гис отображается карта и поступает информация о ме-

стоположении объектов. Главный экран программного обеспечения показан на рисунке 2.

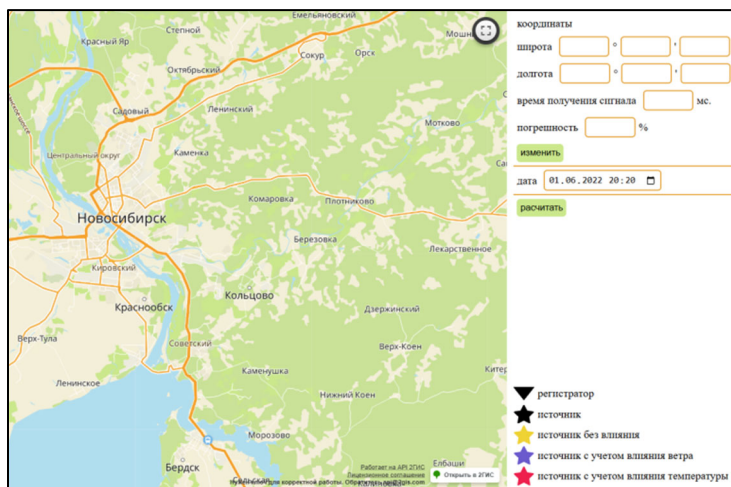


Рис. 2. Фрагмент главного экрана разработанного программного обеспечения

Серверная часть реализована на языке Python. Для обработки запросов и управления API используется Flask. Информация о погоде запрашивается с open-meteo.

Результаты

Для определения значимости влияния различных факторов окружающей среды проведен эксперимент. Он заключается в локализации акустического источника с учетом различных погодных факторов. Выбраны состояния природы, при которых будут проводиться расчеты:

- без учета влияния погодных условий;
- температура окружающей среды;
- скорость и направление ветра;
- температура окружающей среды, скорость и направление ветра.

Вычисления выполнялись относительно трех микрофонов, расположенных на координатах (54,93, 82,98), (54,8, 82,66) и (54,97, 82,61). Время прихода звуковой волны на каждый 46,52, 36,81 и 36,82 секунд соответственно.

На первом этапе локализация акустического источника осуществляется с использованием фиксированного значения скорости распространения звука, равного 331,4 м/с, соответствующего стандартной температуре 0 °С при отсутствии ветра [7].

Цель данного этапа – определить базовый уровень погрешности локализации, с которым впоследствии будут сравниваться результаты, полученные с учетом различных факторов окружающей среды.

При визуализации области погрешности локализации наблюдается достаточно симметричное распределение, обусловленное геометрическим расположе-

нием микрофонов и отсутствием поправок на варьирующиеся метеорологические параметры (см. рисунок. 3).

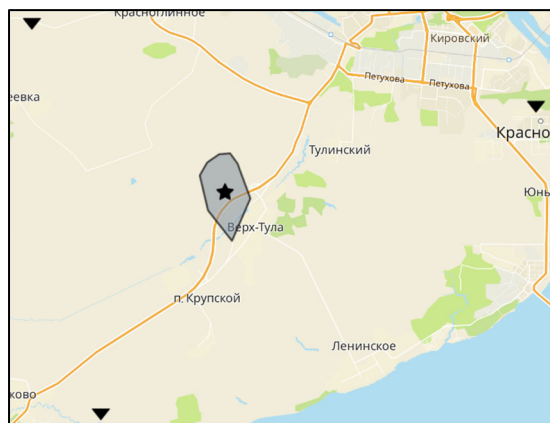


Рис. 3. Вычисленное местоположение источника без учета погодных условий

Результат служит референсной точкой для дальнейшего сравнения и количественной оценки вклада погодных факторов в общее смещение и разброс оценок координат источника.

На следующем этапе эксперимента была учтена поправка на температуру окружающей среды. Скорость звука рассчитывалась индивидуально для каждого микрофона с учетом локального значения температуры воздуха в его окрестности. Для расчета использовалась термодинамическая формула (2), описанная выше. Рассмотрены температурные значения, равные -40 и $+40$ °C, что соответствует типичным краевым диапазонам для наружных условий.

Результаты позволяют оценить влияние неоднородной температурной обстановки на точность локализации источника звука при иных неизменных условиях.

При вычислениях относительно температуре -40 °C (см. рисунок 4), аналогично предыдущему этапу, визуализированная область погрешности локализации достаточно симметрична распределена, но заметно уменьшена. Расположение выбранной референсной точки и полученной отличаются на 150,96 метров.

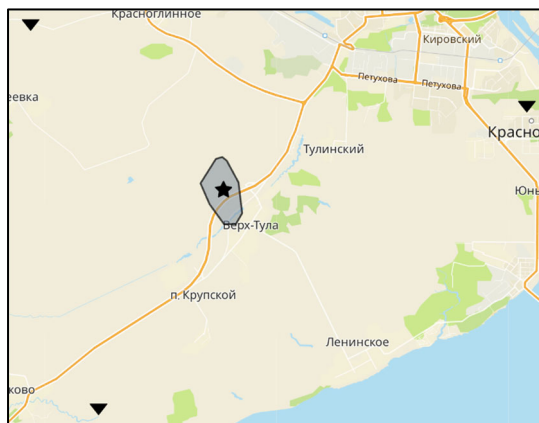


Рис. 4. Вычисленное местоположение источника с учетом влияния низкой температуры окружающей среды

Для оценки влияния высокой температуры была проведена аналогичная серия вычислений при температуре окружающей среды $+40^{\circ}\text{C}$ (см. рисунок 5). Область погрешности увеличилась, а разница между референсной точкой и полученной составила 139,49 метров.

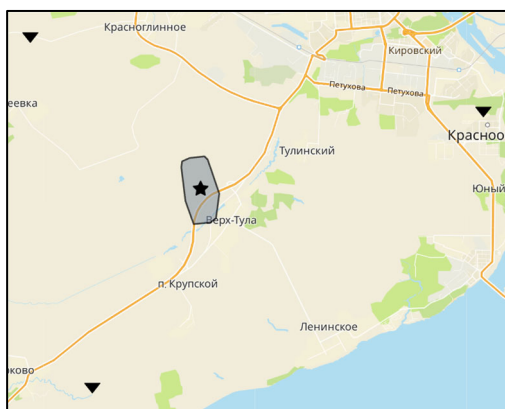


Рис. 5. Вычисленное местоположение источника с учетом влияния высокой температуры окружающей среды

По результатам можно сказать, что повышение температуры приводит к увеличению скорости звука, а уменьшение температуры к уменьшению скорости звука, соответственно изменение температуры оказывает влияние на погрешность и стабильность процесса локализации.

На 3 этапе эксперимента была учтена поправка на скорость и направление ветра. Скорость звука для каждого микрофона корректировалась в зависимости от модуля скорости ветра и угла между направлением ветра и направлением на микрофон. Расчет эффективной скорости звука осуществлялся по формуле (3).

Были рассмотрены несколько сценариев:

- слабый северо – западный ветер (скорость $0,1\text{ м/с}$, направление 300°),
- сильный северо – западный ветер (скорость 32 м/с , направление 300°).

При слабом ветре ($0,1\text{ м/с}$) отклонение локализованной точки от референсной было незначительным ($4,01\text{ метров}$), что соответствует ожидаемому результату (см. рисунок 6).

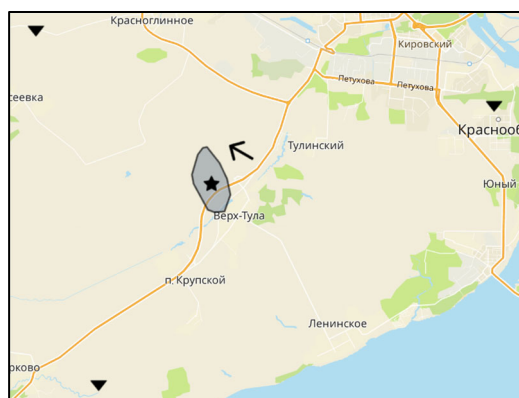


Рис. 6. Вычисленное местоположение источника с учетом влияния слабого ветра

При сильном ветре (32 м/с) ошибка локализации акустического источника существенно увеличилась (1319 метров), а смещение локализованной позиции происходило преимущественно в сторону противоположную направлению ветра (см. рисунок 7).

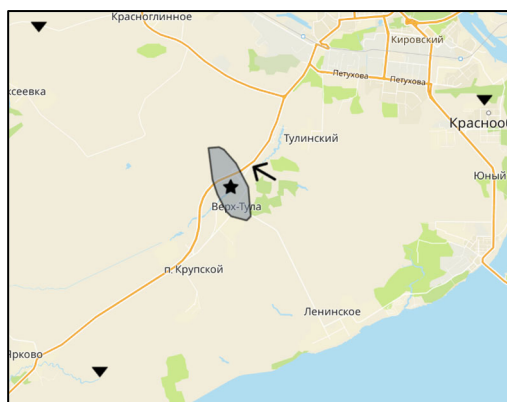


Рис. 7 Вычисленное местоположение источника с учетом влияния сильного ветра

На заключительном этапе эксперимента была проведена оценка влияния комбинации погодных факторов – температуры воздуха и параметров ветра (скорости и направления) – на погрешность локализации акустического источника.

В эксперименте одновременно варьировались следующие параметры:

- температура окружающей среды: -40°C и $+40^{\circ}\text{C}$;
- скорость ветра: 17 м/с и 32 м/с;
- направление ветра: 45° , 90° и 300° .

Этап направлен на определение характера изменений погрешности локализации при одновременном воздействии нескольких факторов и выявление наиболее критичных сочетаний условий. Подробнее показано в таблице 1.

Таблица 1

Комбинации факторов, влияющих на локализацию акустического источника

№	Скорость ветра (м/с)	Направление ($^{\circ}$)	Температура ($^{\circ}\text{C}$)	Отклонение (м)	Относительная погрешность (%)
1	17	90	-40	632, 0	136
2	17	90	40	821, 9	176, 9
3	17	45	40	777, 8	167, 4
4	17	45	-40	625, 8	134, 7
5	17	300	-40	874, 5	188, 3
6	17	300	40	538, 2	115, 8
7	32	90	-40	1332, 1	286, 8
8	32	90	40	1434, 2	308, 7
9	32	45	40	1352, 3	291, 1
10	32	45	-40	1282, 4	276, 1
11	32	300	-40	1556, 0	335
12	32	300	40	1119, 5	241

Как видно из результатов экспериментов, наибольшее отклонение вычисленных координат акустического источника наблюдается при высокой скорости ветра (32 м/с) и отрицательной температуре (-40°C), особенно при направлении ветра 300° , где ошибка достигла 1556 метров, что соответствует относительной погрешности 335 %.

При умеренной скорости ветра (17 м/с) величины отклонений существенно ниже, в среднем на 600–800 метров, что соответствует относительной погрешности от 115 % до 188 %, при этом направление ветра также заметно влияет на величину ошибки.

Обсуждение

Сравнение полученных координат акустического источника при локализации без учета влияния погодных условий и с учетом влияния температуры окружающей среды, скорости и направления ветра отклонение составило от 115,9% до 335%, что показывает существенное влияние погодных условий на погрешность локализации акустического источника.,

Влияние каждого погодного параметра по отдельности также сказывается на погрешности локализации акустического источника. Скорость и направление ветра оказывают асимметричное влияние на распространение звуковых волн и, следовательно, на погрешность определения координат акустического источника. Учет температуры воздуха тоже влияет на скорость распространения звука, и его игнорирование может приводить увеличению погрешности при определении координат.

Следовательно, использование математической модели, учитывающей погодные условия, позволяет уменьшить погрешность без необходимости увеличения количества микрофонов.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило влияние погодных условий на погрешность локализации акустического источника. Эксперименты с использованием метода TDOA продемонстрировали, что температура воздуха способствует изменению скорости распространения звука, что приводит к смещению расчетных координат источника. При повышении температуры до $+40^{\circ}\text{C}$ ошибка локализации составила 139,49 м, а при понижении до -40°C – 150,96 м, что соответствует относительной погрешности около 30 %. Скорость и направление ветра оказывают асимметричное воздействие. Сильный ветер (32 м/с) вызвал отклонение до 1556 м, что соответствует относительной погрешности 335 % и на порядок превышает погрешности, связанные с температурой. Комбинация факторов (низкая температура и сильный ветер) приводит к наибольшим ошибкам, подчеркивая необходимость комплексного учета параметров среды. Результаты работы указывают на критическую важность интеграции метеорологических данных в алгоритмы акустической локализации.

В дальнейшем планируется расширение диапазона анализируемых параметров (например, влажность, рельеф местности). Полученные данные служат осно-

вой для оптимизации систем звуковой локализации в городских, промышленных и природоохранных участках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Jinzhou, Li Joint TDOA, FDOA and PDOA Localization Approaches and Performance Analysis / Li Jinzhou // Remote Sensing. – 2023. – Т. 15, № 4
3. Шаход Д. М., Агафонов Е. Д. Анализ подходов и методов локализации акустических источников // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2024. – Т. 17, № 3. – С. 380–398.
4. Точилин, С. Н., Комиссаров П. В., Басакина С. С. Оценка погрешностей определения тротилового эквивалента воздушных взрывов // Химическая физика. – 2020. – Т. 39, № 8. – С. 35-39.
5. Laplace Correction – Explanation, Derivation, Examples, and FAQs [Электронный ресурс] // GeeksforGeeks. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/laplace-correction/>
6. 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.
7. Wong G. S. K. Speed of sound in standard air // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1986. – Т. 79, № 5. – С. 1359–1366

© А. М. Осипова, А. А. Якименко, 2025

М. В. Платонова^{1✉}, В. Д. Котлер¹, Е. Г. Климова¹

Оценка приземной концентрации и эмиссии метана с поверхности Земли на основе применения алгоритма ансамблевого фильтра Калмана

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: gumoznaya@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассматривается система усвоения данных для оценки приземной концентрации и эмиссии метана с поверхности Земли на основе ансамблевого фильтра Калмана. В ходе исследования используются прогнозы глобальной модели переноса и диффузии в атмосфере и спутниковые данные для поиска оценки эмиссии в заданных регионах за заданные временные интервалы. Приводятся результаты численных экспериментов со спутниковыми данными AIRS. Предложенная методика позволяет точно выявлять области повышенной эмиссии метана для дальнейшего более детального анализа источников метана.

Ключевые слова: усвоение данных, эмиссия метана

M. V. Platonova^{1✉}, V. D. Kotler¹, E. G. Klimova¹

Estimation of surface methane concentration and emission using ensemble Kalman filter algorithm

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: gumoznaya@gmail.com

Abstract. The paper presents a data assimilation system for estimating surface-level methane concentration and emissions from the Earth's surface, based on the ensemble Kalman filter. The approach combines forecasts from a global atmospheric transport and diffusion model with satellite observations to estimate methane emissions in specific regions over defined time intervals. The results of numerical experiments using AIRS satellite data are presented. The proposed methodology enables accurate identification of areas with elevated methane emissions, providing a basis for further detailed analysis of methane sources.

Keywords: data assimilation, methane emission

Введение

В условиях глобального изменения климата задача количественной оценки эмиссий парниковых газов, особенно метана, становится одной из ключевых в области мониторинга окружающей среды. Метан — высокоактивный парниковый газ, чья способность к поглощению теплового излучения делает его важным индикатором как естественных, так и антропогенных процессов в биосфере.

Одним из наиболее эффективных подходов к решению подобных задач является использование алгоритмов усвоения данных (data assimilation), интегри-

рующих данные наблюдений (например, спутниковые данные) с результатами расчётов модели атмосферы для получения оптимальной оценки состояния системы. Наиболее распространённые алгоритмы включают вариационные методы (4D-Var) и фильтры Калмана (в том числе ансамблевые модификации, EnKF).

Методы и алгоритмы

В данной работе рассматривается применение современных методов усвоения данных, в частности локального детерминированного ансамблевого фильтра Калмана [1–4], к задаче оценки приземной концентрации парниковых газов и поиск оценки эмиссии парникового газа на основе оценки приземной концентрации. Основной акцент сделан на оценке приземных концентраций метана с использованием спутниковых данных и результатов численного моделирования. На основе получаемых оценок приземных концентраций выполняется расчет пространственно-временного распределения эмиссии метана.

Для оценки эмиссии парниковых газов используется алгоритм, основанный на пересчёте приземной концентрации загрязняющих веществ в эмиссию, реализуемый на основе бокс-метода [5, 6]. Данный подход успешно применялся в ряде исследований, связанных с оценкой выбросов над урбанизированными территориями [5, 6].

Расчёт эмиссии F парниковых газов на единицу площади и времени осуществляется по формуле:

$$F = \Delta C_i \cdot H / \tau,$$

где:

ΔC_i — прирост приземной концентрации загрязняющего вещества по сравнению с фоновым уровнем,

H — высота слоя перемешивания,

τ — время изменения концентрации.

Значения H берутся из данных реанализа CAMS [7], что позволяет учитывать сезонную и региональную изменчивость атмосферных условий.

Для определения общего количества вещества Q , поступающего в воздушную массу над территорией площадью S , используется следующая формула:

$$Q = F \cdot S,$$

где F — локальная эмиссия;

S — площадь рассматриваемого участка.

В численных экспериментах для моделирования атмосферных процессов использовалась глобальная химико-транспортная модель MOZART-4 (Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4). Эта модель была разработана в рамках международного проекта Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) и представляет собой инструмент для оценки вклада различных источников и атмосферных процессов в формирование распределения загрязняющих веществ. MOZART-4 включает более 100 химических

компонентов, включая озон, метан, оксиды азота, летучие органические соединения и другие. Модель распространяется как программное обеспечение с открытым исходным кодом, что делает её доступной для модификации и адаптации под конкретные задачи моделирования [8, 9].

В численных экспериментах использовались спутниковые данные, полученные с помощью инструмента AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) [8, 9]. AIRS позволяет получать данные о концентрациях углекислого газа, метана, озона, оксида азота, водяного пара и других компонентов атмосферы. Кроме того, в ходе численных экспериментов используются данные из базы реанализа CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service). Реанализ CAMS включает в себя трёхмерные поля концентраций атмосферных компонентов, температуры, давления и других метеорологических параметров.

Результаты экспериментов

Алгоритм оценки эмиссии парниковых газов с поверхности Земли по данным наблюдений с использованием глобальной модели переноса и диффузии включает несколько этапов:

1. Оценка проводится для заданного временного интервала, в течение которого значения приземной концентрации метана считается постоянной.
2. Разбиение поверхности Земного шара на подобласти: поверхность Земли разбивается на регионы, для каждого из которых проводится поиск оценки. При этом применяются локальные алгоритмы, позволяющие проводить вычисления независимо для каждой точки подобласти, что обеспечивает эффективность процесса поиска оценки.
3. Данные наблюдений разделяются на блоки по временным интервалам и подобластям.
4. Для объединения данных наблюдений и прогнозов по модели используется оператор интерполяции, который включает в себя прогноз по модели к моменту наблюдения и интерполяцию из узлов сетки в точки наблюдений.
5. Для получения оптимальной оценки приземной концентрации метана используются формулы ансамблевого локального детерминированного фильтра Калмана, которые комбинируют данные наблюдений и прогнозы по модели.

В рамках численных экспериментов были получены оценки приземных концентраций метана и рассчитаны на их основе оценки эмиссий в подобластях, расположенных на территории России, за летний месяц июнь за 2016 год. В качестве исходных данных использовались расчеты по модели MOZART-4, охватывающие интервал с 1 января по 25 июня 2016 года, а также спутниковые наблюдения AIRS за указанный период.

Оценка производилась с использованием усреднённых значений за семидневные интервалы. Территория была разбита на подобласти с площадью примерно 1000×1000 км. С учётом пространственного разрешения модели (основной шаг сетки составляет приблизительно 2.8°), в каждую подобласть входило около 8 узлов. Для повышения плотности пространственной оценки и проведения сопоставления со спутниковыми данными в модельную сетку были введены

дополнительные точки, что позволило увеличить разрешение до эквивалентного шага около 1.4° .

Для каждого узла сетки в радиусе 65 км отбирались соответствующие спутниковые измерения, после чего проводилось их осреднение. В рамках контроля качества исключались наблюдения, чьи значения значительно отклонялись от прогноза модели.

Для оценки эмиссии использовалось первое приближение, равное нулю (ввиду отсутствия достоверной априорной информации о распределении эмиссии). Генерация ансамбля возмущений для реализации алгоритма LETKF осуществлялась с использованием нормально распределённых случайных величин с нулевым средним и дисперсией 20 ppb.

В качестве ошибок наблюдений были заданы значения в 20 ppb, ошибки модели принимались равными 30 ppb. Эти значения выбраны на основании информации из документации и данных аналогичных исследований.

На рисунке представлена визуализация оценок эмиссии для некоторых регионов России за летний период (июнь 2016 года) (рис. 1). Для отображения пространственного распределения эмиссии использован градиент цвета, который позволяет выделить различные уровни интенсивности эмиссии. Чем ярче или насыщеннее цвет, тем выше интенсивность эмиссии в соответствующем регионе.

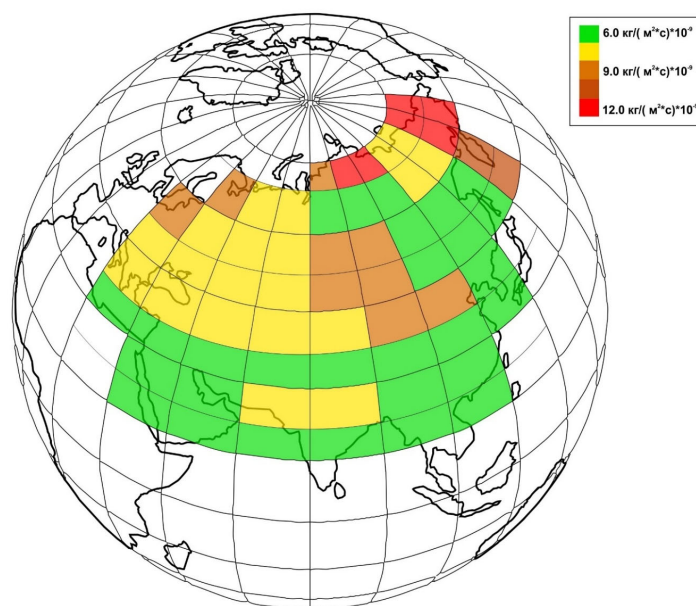


Рис.1. Оценка эмиссии метана по подобластям (средняя за июнь 2016 года)

Как демонстрирует рисунок, в пределах исследуемого региона зафиксирована значительная пространственно-временная изменчивость потоков этого газа. Такие колебания могут быть обусловлены не только наличием природных и ан-

тропогенных источников. Также следует учитывать неравномерное распределение источников эмиссий, включая промышленные предприятия, сельскохозяйственные комплексы и иные малодифференцированные источники, не учтённые в базовой конфигурации модели. Указанная вариативность в пространственном и временном поведении потоков метана подчёркивает необходимость более точной калибровки модели для отдельных территорий.

Заключение

В работе приводятся результаты численных экспериментов с реальными спутниковыми данными AIRS по оценке эмиссии метана с поверхности Земли. Обнаруженные особенности пространственной и сезонной динамики потоков метана подтверждают актуальность применения методов усвоения данных для оценки состояния атмосферы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Климова Е. Г. Применение алгоритма ансамблевого сглаживания Калмана в задаче обратного моделирования для моделей переноса и диффузии // Сибирский журнал вычислительной математики. - 2024. - Т.27. - № 3. - С.287-302. DOI: 10.15372/SJNM20240303
2. Котлер В. Д., Платонова М. В., Климова Е. Г. Структура информационно-вычислительной системы для решения задачи усвоения данных при моделировании окружающей среды // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. - 2024. - Т.22. - № 1. - С.21-30. DOI: 10.25205/1818-7900-2024-22-1-21-30
3. Платонова М. В., Котлер В. Д., Климова Е. Г. Оценка приземной концентрации метана на основе алгоритма ансамблевого фильтра Калмана с привлечением транспортной химической модели // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. - 2024. - Т.22. - № 1. - С.62-72. DOI: 10.25205/1818-7900-2024-22-1-62-72
4. Платонова М. В., Котлер В. Д., Климова Е. Г. Сравнительный анализ распределения эмиссии метана в заданных регионах по спутниковым наблюдениям и расчетам по модели переноса и диффузии // Вычислительные технологии. - 2024. - Т.29. - № 4. - С.41-54. DOI: 10.25743/ICT.2024.29.4.004
5. Brasseur G. P. and Jacob D. J. Modeling of Atmospheric Chemistry Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2017.
6. Elansky N. F., Ponomarev N. A., Verevkin Y. M., Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014, Atmos. Environ. 2018. -V. 175. P. 504–515. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.057>
7. CAMS reanalysis is in production <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/cams-global-reanalysis> – Электронные данные
8. Lagutin A. A., Mordvin E. Yu., Volkov N. V., Methane emission by petroleum industry in Western Siberia according to satellite observations // Atmospheric Physics. – 2021. - Vol. 119166N. DOI 10.1117/12.2603438
9. Lagutin A. A., Mordvin E. Yu., Volkov N. V., Regression model for reconstruction of the total methane content according to the data from AIRS hyperspectrometer and chemical transport model MOZART-4 // Atmospheric Physics. – 2023. - Vol. 1278062. DOI 10.1117/12.2690784.

© М. В. Платонова, В. Д. Котлер, Е. Г. Климова, 2025

*В. Ф. Рапута¹✉, М. А. Запезалов², Т. В. Ярославцева^{1,3},
А. А. Леженин¹, В. А. Сурнин², А. О. Корунов²*

Особенности распределения полициклических ароматических углеводородов по территории г. Красноярска

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

²Научно-производственное объединение «Тайфун»,
г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация

³Новосибирский институт гигиены Роспотребнадзора,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: raputa@sscc.ru

Аннотация. В связи с высокими уровнями загрязнения атмосферного воздуха полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) поиск их источников на территориях городов является актуальной задачей. С использованием результатов измерений концентраций шестнадцати компонентов ПАУ в снежном покрове г. Красноярска проведено исследование статистических связей компонентного состава в 47 точках, принадлежащих различным районам города. Установлен высокий уровень соответствия состава для пар точек, находящихся преимущественно под воздействием выбросов «Русала». Аналогичная картина имеет место для точек, расположенных в окрестностях ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2. Показано, что уровень корреляционных связей резко снижается при проведении сравнения состава ПАУ в пробах снега, отобранных в районе «Русала», с содержаниями ПАУ в пробах снега из окрестностей ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2. Установлена идентичность компонентного состава ПАУ в снеговых пробах из районов ТЭЦ-3 и «Русала», что является следствием их взаимного расположения и зимней розы ветров. Выявленная индивидуальность компонентного состава ПАУ в атмосферных выбросах «Русала» создает практические возможности контроля их поступления на территорию города.

Ключевые слова: загрязнение города, полициклические ароматические углеводороды, снежный покров, корреляционный анализ, ВЭЖХ

*V. F. Raputa¹✉, M. A. Zapevalov², T. V. Yaroslavtseva^{1,3},
A. A. Lezhenin¹, V. A. Surnin², A. O. Korunov²*

Features of the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the territory of Krasnoyarsk

¹Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²Scientific and Production Association "Typhoon", Obninsk, Russian Federation

³Novosibirsk Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: raputa@sscc.ru

Abstract. Due to high levels of air pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), the search for their sources in urban areas is a pressing issue. Using the results of measuring the concentrations of sixteen PAH components in the snow cover of Krasnoyarsk, a study was conducted of the statistical relationships between the component composition at 47 points in different areas of the city. A high level of compositional correspondence was established for pairs of points that are

primarily affected by emissions from Rusal. A similar picture is observed for points located in the vicinity of TPP-1 and TPP-2. It was shown that the level of correlations sharply decreases when comparing the PAH composition in snow samples taken in the Rusal area with the PAH contents in snow samples from the vicinity of TPP-1 and TPP-2. The identity of the component composition of PAHs in snow samples from the vicinity of TPP-3 and Rusal has been established, which is a consequence of their mutual location and the winter wind rose. The revealed individuality of the component composition of PAHs in the atmospheric emissions of Rusal creates practical opportunities for monitoring their entry into the city.

Keywords: urban pollution, polycyclic aromatic hydrocarbons, snow cover, correlation analysis, HPLC

Введение

Существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха городов Сибири вносят полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Проблема загрязнения ПАУ наиболее остро проявляется в Красноярске, Кемерово, Новокузнецке, Иркутске, Братске, Чите, Улан-Удэ [1-4]. Максимальные концентрации

ПАУ фиксируются в холодные месяцы [5], что объясняется повышенными объёмами сжигания органического топлива на тепловых станциях и автономных источниках теплоснабжения. Особую роль в этих процессах играют климатические условия [6].

К основным источникам выбросов ПАУ в атмосферу относятся металлургические, химические предприятия, объекты теплоэнергетического комплекса, автотранспорт [7, 8]. Для идентификации источников загрязнения необходимо определение компонентного состава ПАУ [9]. Измеряемые концентрации ПАУ являются результатом суммации разнонаправленных процессов, включающих в себя, наряду с прямой эмиссией, фотохимическую трансформацию, сухое и влажное осаждение, биохимическое разложение. Для определения компонентного состава ПАУ в атмосферном воздухе, природных планшетах необходимо применение современных методов анализа с высокой селективностью и чувствительностью. Одним из них является метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с флуориметрическим детектированием [10].

Эффективным методом, позволяющим получить информацию о выпадениях загрязняющих примесей из атмосферы на поверхность земли, является исследование почвенного, растительного и снежного покрова [11-13]. При планировании сети мониторинга следует учитывать сведения об имеющихся источниках загрязнения атмосферного воздуха, характеристиках примесей, метеорологических условиях, результатах предыдущих наблюдений. Конечными целями исследования является: определение основных загрязняющих веществ, пространственно-временная динамика их распространения, оценивание потоков этих веществ на подстилающую поверхность [14-16].

Снеговой покров города является хорошим индикатором антропогенных выбросов ПАУ [14, 17-20]. Содержание ПАУ в снеге к концу зимнего сезона становится максимальным, что позволяет с высокой точностью находить их концентрации. Особое значение эти исследования приобретают при изучении длитель-

ного загрязнения территорий [21, 22]. Следует также отметить, что поля концентраций примесей в снежном покрове зависят от мощности эмиссии, продолжительности периода накопления, параметров источников, метеорологических условий.

Объекты и материалы исследования

По географическим условиям территория г. Красноярска расположена в зоне высокого потенциала загрязнения атмосферы. Возникновению экстремальных концентраций ПАУ в холодный период года способствует частая повторяемость неблагоприятных метеоусловий, которые характеризуются слабыми ветрами, штилями, инверсиями температуры, испарениями с р. Енисея [23].

Объектом исследования служил снеговой покров г. Красноярска в окрестностях ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3 и «Русала». Основными компонентами их выбросов являются ПАУ. ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 находятся в пределах городской застройки. ТЭЦ-3 расположена в северо-восточной части города и непосредственно попадает в зону влияния доминирующих выбросов ПАУ от «Русала». Схемы отбора снеговых проб в окрестностях рассматриваемых источников представлены на рис. 1 и рис. 2.

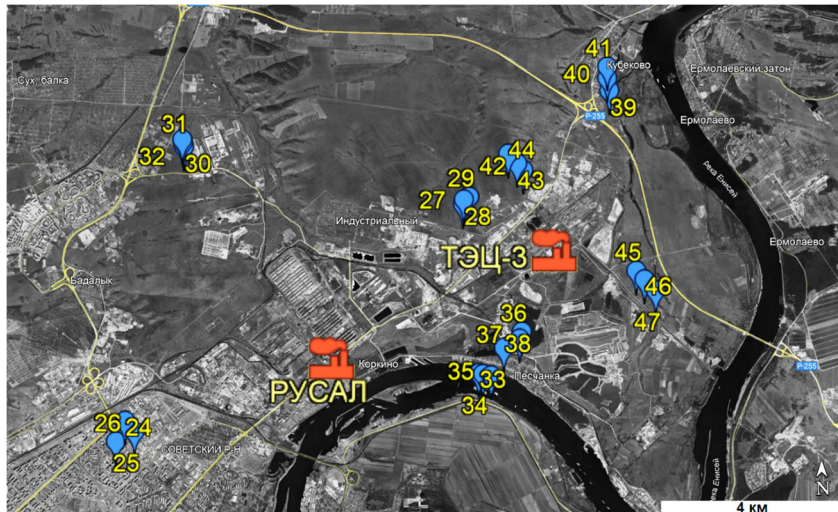


Рис. 1. Схемы отбора проб снега в окрестностях ОАО «Русал» и ТЭЦ-3

Согласно рис. 1 отбор проб снега по отношению к промплощадкам «Русала» и ТЭЦ-3 проводился по четырём направлениям. На каждом направлении находилась подгруппа из трёх достаточно близкорасположенных точек, что позволяет проводить дополнительный контроль компонентного состава ПАУ в снеговых пробах. Удаления от промплощадок точек отбора проб составляет от 1 до 5

км. Отбор проб снега был проведён в конце зимнего сезона 2018 г. сотрудниками Среднесибирского УГМС.

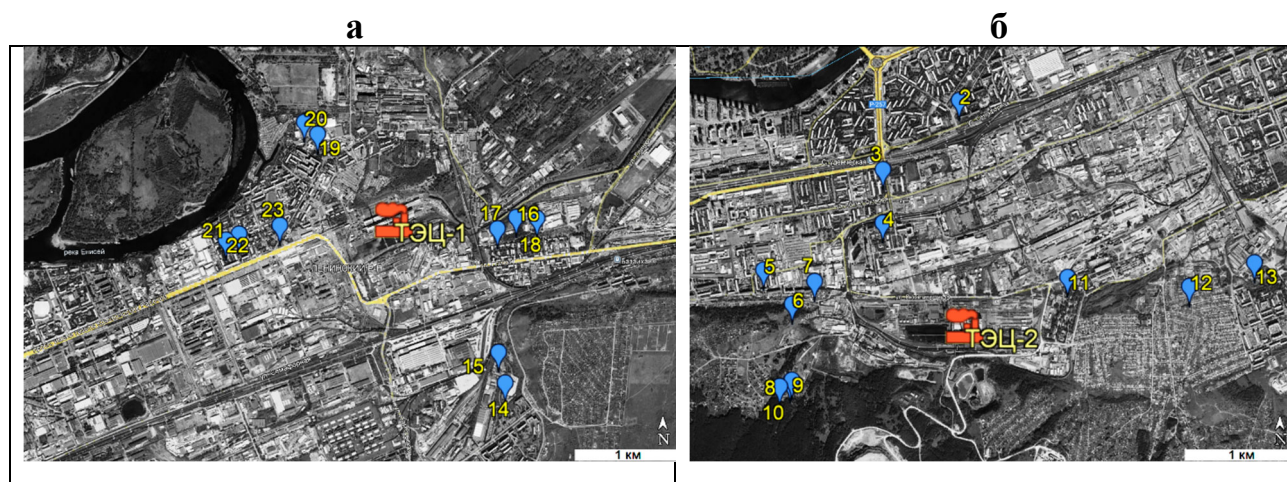


Рис. 2. Схемы отбора проб снега в окрестностях ТЭЦ-1 (а) и ТЭЦ-2 (б)

Рис. 2 показывает, что в случае ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 точки на маршрутах пробоотбора в большей степени рассредоточены между собой. Это позволяет оценить динамику изменения концентраций ПАУ по мере удаления от труб рассматриваемых ТЭЦ.

Химический анализ снеговых проб выполнялся в аккредитованной лаборатории Института проблем мониторинга ФГБУ «НПО «Тайфун» (г. Обнинск). Используемая методика обеспечивает выполнение измерений с погрешностью, не более 25% [15]. В пробах были определены содержания следующих 16 компонентов ПАУ: нафталина, аценафтилена, аценафтена, флуорена, фенантрена, антрацена, флуорантена, пирена, бенз(а)антрацена, хризена, бенз(б)флуорантена, бенз(к)флуорантена, бенз(а)пирена, дибенз(а, h)антрацена, бенз(g, h, i)перилена, инден[1,2,3-с, d]пирена. Они содержат от 2-х до 6-ти конденсированных ароматических кольца и могут находиться, как в растворе, так и на аэрозолях.

Результаты и обсуждения

Из анализа результатов мониторинга снежного покрова г. Красноярска следует наличие значительных концентраций ПАУ на территории города. В первую очередь, это относится к зоне интенсивного воздействия атмосферных выбросов ПАУ от «Русала», которая расположена севернее промплощадки завода. Тем не менее рис. 3а и рис. 3б показывают высокий уровень корреляционных связей компонентного состава между точками наблюдений из этой зоны.

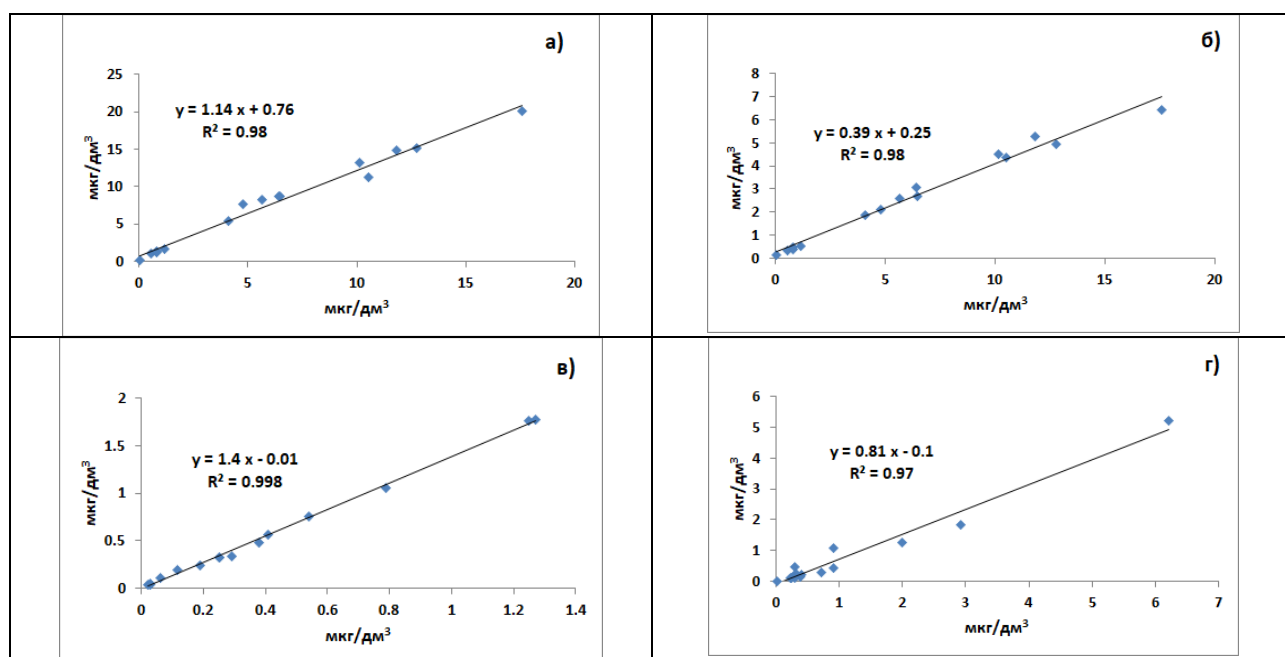


Рис. 3. Попарные корреляционные зависимости между компонентами ПАУ, измеренных в точках 29 и 26 (а), 29 и 39 (б), 2 и 3 (в), 11 и 12 (г)

На рис. 3в и 3г представлены результаты корреляционного анализа данных измерений компонентов ПАУ в точках пробоотбора снега из окрестности ТЭЦ-2. Имеет место также высокий уровень согласия. Особо следует обратить внимание на рис. 3в, где наблюдается практически полное попадание измеренных значений концентраций компонентов ПАУ на линию регрессии и что подчёркивает качество проведённых экспериментальных и химико-аналитических исследований. Результаты, приведённые на рис. 3, показывают наличие в рассматриваемых случаях доминирующих источников ПАУ, которые обеспечивают высокий уровень корреляционных связей.

На рис. 4 представлены корреляционные связи компонентного состава ПАУ между парами точек наблюдений, расположенных на значительных удалениях друг от друга.

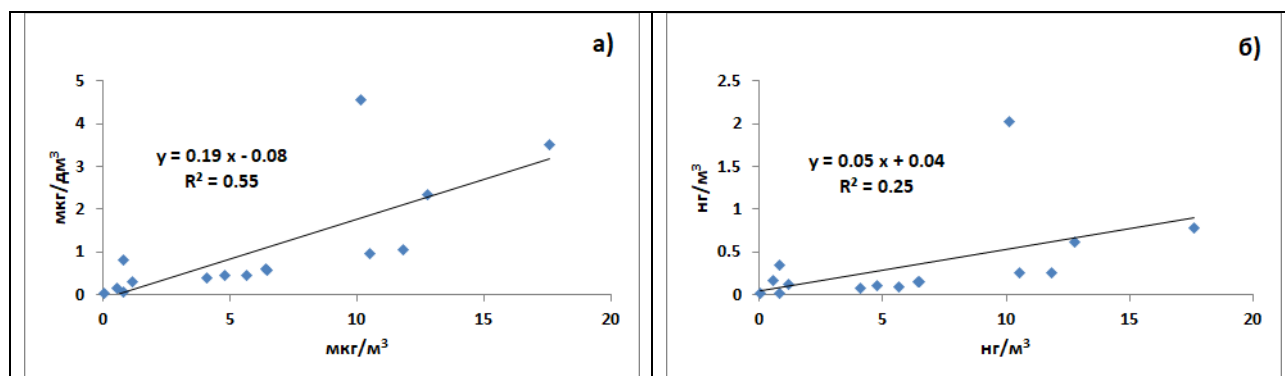


Рис. 4. Попарные корреляционные зависимости между компонентами ПАУ между точками 29 и 20 (а), 29 и 9 (б)

Эти точки находятся под воздействием выбросов существенно разных источников. Из анализа рис. 4а следует наличие значительных различий компонентного состава выбросов ПАУ с промплощадки «Русала» и ТЭЦ-1. Аналогичный результат был получен при сравнении концентраций ПАУ в окрестностях ТЭЦ-2 и промплощадки «Русал». Сравнение же компонентного состава в окрестностях ТЭЦ-3 и «Русала» значимых различий не выявило, что объясняется доминирующими объёмами выбросов ПАУ от алюминиевого завода и их вкладом в формирование суммарных полей концентраций по сравнению с выбросами рассматриваемой ТЭЦ. Полученные результаты указывают на возможность использования информации о различиях в компонентном составе выбросов ПАУ с промплощадки «Русала» для оценки их влияния на атмосферу города.

Заключение

Проведено исследование корреляционных связей между компонентами ПАУ в снежном покрове г. Красноярска. Выполненный сравнительный анализ показал высокий уровень согласия для пар точек, находящихся исключительно под воздействием выбросов «Русала» или ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2. Если же одна из точек находится под доминирующим влиянием выбросов «Русала», а другая расположена в окрестности ТЭЦ-1 или ТЭЦ-2, то уровень связей существенно снижается, что указывает на значительные различия компонентного состава выбросов ПАУ от рассматриваемых источников. Установленная индивидуальность компонентного состава выбросов ПАУ от промплощадки «Русала» создает возможности для оценивания вклада выбросов данного предприятия в загрязнение территорий г. Красноярска.

Характерная для Красноярска зимняя роза ветров обеспечивает преобладающий вынос ПАУ в северо-восточном секторе, что указывает на относительно небольшой вклад выбросов «Русала» в загрязнение основной территории города в холодный период года. Наблюдения, проведенные в окрестностях ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2, подтверждают вышеизложенное утверждение. Корреляционный анализ данных наблюдений снегового покрова в окрестностях ТЭЦ-3 показал идентичность компонентного состава с выбросами «Русала», что объясняется особенностями взаимного расположения этих источников.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безуглая Э. Ю., Смирнова И. В. Воздух городов и его изменения. – СПб.: Астерион, 2008. – 253 с.
2. Ануфриева А. Ф., Загайнова М. С., Ивлева Т. П., Любушкина Т. М., Смирнова И. В. Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2016 г. – Санкт-Петербург: ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова», 2017. – 228 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2023 году». – Красноярск, 2024. [Электронный ресурс]. URL: http://www.mpr.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/28086_2024.06.28.pdf (дата обращения: 10.03.2025).
4. Доклад об экологической ситуации в Забайкальском крае за 2023 год [Электронный ресурс]. URL: <https://minpriir.75.ru/deyatel-nost/ohrana-okruzhayuschey-sredy/ekologicheskaya-situaciya-v-zabaykal-skom-krae> (дата обращения: 10.03.2025).

5. Безуглая Э. Ю., Расторгуева Г. П., Смирнова И. В. Чем дышит промышленный город. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 256 с.
6. Селегей Т. С. Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири. – Новосибирск: Наука, 2005. – 347 с.
7. Суздорф А. Р., Морозов С. В., Кузубова Л. И., Аншиц Н. Н., Аншиц А. Г. Полициклические ароматические углеводороды в окружающей среде: источники, профили и маршруты превращения // Химия в интересах устойчивого развития. – 1994. – Т. 2. – № 2–3. – С. 511–540.
8. Халиков И. С. Идентификация источников загрязнения объектов природной среды полициклическими ароматическими углеводородами с использованием молекулярных соотношений // Экологическая химия. – 2018. – Т. 27. – № 2. – С. 76–85.
9. Халиков И. С. Оценка возможности диагностики источников загрязнения атмосферного воздуха полициклическими ароматическими углеводородами по их компонентному составу. – Тамбов: ООО "Консалтинговая компания Юком", 2024. – 80 с.
10. Басова Е. М., Иванов В. М. Современное состояние высокоэффективной жидкостной хроматографии полициклических ароматических углеводородов // Вестник Московского университета. – Серия 2: Химия. – 2011. – Т. 52. – № 3. – С. 163–174.
11. Семенов М. Ю., Снытко В. А., Маринайте И. И. Новый метод оценки вкладов источников полициклических ароматических углеводородов в загрязнение объектов природной среды // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 463. – № 1. – С. 94.
12. Белозерцева И. А. Мониторинг загрязнения окружающей среды в зоне воздействия ИркаЗа // Вода: химия и экология. – 2013. – № 10. – С. 33–38.
13. Жидкин А. П., Геннадиев А. Н., Лобанов А. А. Индикационное значение соотношений индивидуальных полициклических ароматических углеводородов в системе снег - почва при разных условиях землепользования // Вестник Московского университета. – Серия 5: География. – 2017. – № 5. – С. 24–32.
14. Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 182 с.
15. Хаустов А. П., Редина М. М., Геохимические маркеры на основе соотношений концентраций полициклических ароматических углеводородов в компонентах окружающей среды // Вода: химия и экология. – 2014. – № 12. – С. 98–107.
16. Ровинский Ф. Я., Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 224 С.
17. Прокачева В. Г., Усачев В. Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного техногенного загрязнения в сфере влияния городов и дорог // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 3. – С. 94–106.
18. Журба О. М., Меринов А. В., Шаяхметов С. Ф., Алексеенко А. Н. Гигиеническая оценка загрязнения тяжёлыми металлами и органическими соединениями снежного покрова многопрофильного индустриального города // Гигиена и санитария. – 2024. – Т. 103. – № 9. – С. 940–946.
19. Тентюков М. П., Габов Д. Н., Симоненков Д. В., Язиков Е. Г. Загрязнение поверхности снега полициклическими ароматическими углеводородами при образовании изморози // Лёд и снег. – 2019. – Т. 59. – № 4. – С. 483–493.
20. Sun L., Ai X., Yao X., An Q., Liu X., Yakovleva E., Zhang L., Sun H., Zhang K., Zang S. Relationship between atmospheric pollution and polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow during heavy pollution episodes in a cold city, northeast China // Ecotoxicol. Environ. Saf. – 2023. – V. 260. – Article No. 115091.
21. Яковлева Е. В., Василевич М. И., Габов Д. Н. Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове заповедных территорий Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. – 2024. – № 3. – С. 72–81.
22. Raputa V. F., Kokovkin V. V., Morozov S. V., Yaroslavl'tseva T. V. Organic Carbon in the City Territories of the South of West Siberia // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – Т. 24. – № 4. – С. 483–489.
23. Климат Красноярск / Под ред. Ц. А. Швер, А. С. Герасимовой. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 229 с.

© В. Ф. Репута, М. А. Запечалов, Т. В. Ярославцева,
А. А. Леженин, В. А. Сурнин, А. О. Корунев, 2025

Р. В. Романовский¹✉

Наработка опыта в организации полевых работ для целей двумерного моделирования речной гидравлики р. Углегорка (о. Сахалин)

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Российская Федерация
ООО "Восточная Горнорудная Компания", пгт. Шахтерск, Российская Федерация
e-mail: keny146@gmail.com

Аннотация. Для получения качественных результатов при двумерном моделировании речной гидравлики рек, изученных в гидрологическом отношении слабо, необходим определенный набор исходных данных, который позволит полноценным образом произвести калибровку и верификацию модели на этапе ее создания. В данной статье рассмотрен вариант стратегии организации полевых топографических, гидрографических работ и режимных гидрологических наблюдений, основанный на обобщенном опыте автора в области имитационного моделирования. Исходя из опыта работы с двумерной моделирующей системой HEC-RAS, руководствуясь технической документацией на данный расчетный комплекс и опытом других исследователей, автор предлагает подход к организации полевых работ на примере участка р. Углегорка (о. Сахалин), который берет в расчет технические возможности и ограничения конкретной моделирующей системы и может позволить более рационально подходить к планированию видов и объемов полевых работ.

Ключевые слова: Организация полевых работ; двумерное гидродинамическое моделирование; 2D моделирование речной гидравлики; моделирующая система HEC-RAS; подход к организации полевых работ

R. V. Romanovskiy¹✉

Gaining experience in organizing field work for two-dimensional modeling of river hydraulics in the Ulegorka river (Sakhalin Island)

¹National research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation
LLC "Eastern Mining Company," Shakhtersk, Russian Federation
e-mail: keny146@gmail.com

Abstract. In order to obtain qualitative results in two-dimensional modeling of river hydraulics of poorly studied rivers (in hydrological terms), a certain set of input data, which will allow to fully calibrate and verify the model at the stage of its creation, is required. This article considers a strategy of organization of field topographic and hydrographic works, and routine hydrological observations based on the author's generalized experience in the field of simulation modeling. Taking into account his experience of work with the HEC-RAS two-dimensional modeling system, the technical documentation for this calculation complex, and the experience of other researchers, the author suggests a method of organizing field work on the example of the Ulegorka River site (Sakhalin Island). This method takes into account the technical capabilities and limitations of a particular modeling system and can provide a more rational approach to planning the types and amount of field work.

Keywords: organization of field work; two-dimensional hydrodynamic modeling; two-dimensional modeling of river hydraulics; the HEC-RAS modeling system; approach to organizing field work

Введение

Создание гидродинамических моделей участков рек для решения прикладных задач, возникающих на этапе проведения проектно-изыскательских работ сопряжено с разрешением ряда вопросов организационно-технического характера, одним из которых является задача определения стратегии моделирования [1].

Основной массив исходных данных, в случае создания гидродинамических моделей, добывается путем производства полевых топографических, гидрографических и режимных гидрологических работ и наблюдений, которые являются наиболее ресурсозатратным этапом всей работы. В этом контексте крайне важной является правильная оценка имеющихся возможностей и ресурсов организации, а также сбалансированное планирование необходимых работ.

Важность полевого этапа работ по моделированию неоднократно отмечена в работах сотрудников кафедры гидрологии НИ ТГУ, например в работе [2] применительно к задачам исследования динамики потока и русловых процессов, или в работе [3], где модели применялись в контексте исследования заторов на реках.

В связи с этим, а также по причине недостаточной разработанности данной темы, автор считает полезным осветить персональные наработки в области планирования полевых работ для моделирования участка р.Углегорка (о.Сахалин).

Исследуемый участок реки и задачи моделирования

В административном отношении участок работ (рис.1) расположен на Западном побережье центральной части о.Сахалин, МО "Углегорский муниципальный район", Сахалинской области.

Научно-исследовательская работа (НИР) по созданию гидродинамической модели участка р.Углегорка проводится в рамках научного сопровождения для проекта инженерной защиты карьерной выемки от негативного воздействия поверхностных вод. Предполагаемая область моделирования имеет протяженность около 10 км и ширину в наиболее широкой части до 4 км. По классификации, предложенной В.В. Беликовым [4], данный участок можно отнести к классу коротких участков. Исследуемый участок реки расположен более чем в 20-ти км выше по течению от устьевой части и его можно отнести к внутренним участкам рек. Территория острова Сахалин считается одним из наиболее опасных регионов нашей страны в контексте паводковой опасности [5].



Рис. 1. Контур предполагаемой области моделирования на спутниковом снимке местности (ГП – гидрологический пост, ГС 1 и 2- гидрологические створы для временных наблюдений за режимом реки)

Лимитирующей фазой водного режима по объему стока является весеннее половодье, такая ситуация характерна для большинства рек района [6]. Участок, для которого планируется моделирование, согласно уточненному в работе В.Е. Беликова [7] гидрологическому районированию территории о.Сахалин, относится к Центральному или Тымовскому району.

Определение стратегии моделирования участка реки

В используемой автором моделирующей системе HEC-RAS, для двухмерного моделирования используются 4 типа внешних граничных условий [8], которые задаются по внешнему периметру области моделирования:

- 1) Гидрограф отметок уровней воды (stage hydrograph);
- 2) Гидрограф расходов воды (flow hydrograph);
- 3) Нормальная глубина (normal depth);
- 4) Кривая зависимости расхода от уровня воды (rating curve).

Внутренних граничных условий, которые могут задаваться внутри области моделирования, в данной системе существует 2 вида:

- 1) Гидрограф расходов воды (flow hydrograph);
- 2) Атмосферные осадки (precipitation).

В качестве потенциальных вариантов граничных условий в будущей стратегии моделирования могут быть выбраны следующие:

- 1) Входной створ - гидрограф расходов воды, выходной створ - нормальная глубина;
- 2) Входной створ - гидрограф расходов воды, выходной створ - гидрограф отметок уровней воды;
- 3) Входной створ - гидрограф расходов воды, выходной створ - кривая зависимости расхода от уровня воды.

Вариант 1 в конкретном случае оказывается неприемлем, так как данное граничное условие (нормальная глубина) работает адекватно только в том случае,

когда выходной створ отодвинут от области моделирования вниз по течению на довольно значительное расстояние [9, 10]. Для его использования необходимо производить дополнительную топографическую съемку местности.

Варианты 2 и 3 задают условия на верхней и нижней границах моделируемой области достаточно строго, а необходимости в дополнительной дорогостоящей досъемке местности не возникает.

Поэтому, в качестве потенциальных вариантов граничных условий, можно определить варианты 2 и 3 и планировать полевые работы исходя из этого выбора.

Планирование полевых работ

Техническим заданием на проведение работ по моделированию для подготовки и сбора данных определен годовой период с ноября 2024 г. по ноябрь 2025 г. включительно.

Топографические работы. Топографическая съемка местности (пойма и прилегающая территория) будет производиться при помощи технологии лидарной съемки БПЛА (беспилотный летательный аппарат) DJI Matrice 300 RTK или его аналогом. Русловая съемка должна быть произведена профессиональным эхолотом с гидролокатором бокового обзора и встроенным модулем GPS.

По завершению этапа гидрографических работ (русловая съемка эхолотом) и обработки данных, две ЦМР – русловая и прилегающей местности, должны быть сшиты в единую рабочую ЦМР, на основе которой и будет далее разрабатываться гидродинамическая модель.

Исследуемая река Углегорка по классификации Б.Д. Зайкова может быть условно отнесена к группам рек "с половодьем в теплую часть года и типу "дальневосточный". Данный вывод можно сделать исходя из формы ее гидрографа (рис.2). В течение отведенного на сбор данных периода выполнять топографические работы методом лидарной съемки целесообразно в период, во-первых, низкой водности реки, во-вторых, минимального количества растительности. Исходя из анализа гидрографа реки, оптимальным периодом для исследуемой реки будет апрель-май, когда местность уже освободится от снежного покрова, а редкая растительность позволит получить более точную ЦМР. Работы по русловой съемке будет возможным выполнить только после полного схода льда и снижения уровней воды до безопасных значений, а это период с первой декады июня по начало ноября, за исключением дождевых паводков.



Рис. 2. Гидрограф уровней воды р.Углегорка – с.Краснополье за 2009 г.

Наблюдения за расходами и уровнями воды, является крайне важным этапом для создания адекватной модели. Исходя из имеющихся границ области моделирования и положения ведомственного поста Росгидромета, были определены два гидрологических створа – гидроствор 1 и гидроствор 2 (ГС-1 и ГС-2). Располагать их целесообразно в районе предполагаемых входного и выходного створов будущей модели (рис.1).

Ведомственный гидрологический пост (ГП) на р.Углегорка расположен в с. Краснополье и на нем велись наблюдения с 04.08.1947 г., однако, наблюдения за расходами воды, проводившиеся в период с 1952 по 1996 гг., имеют ряд пропусков внутри этого периода, что впоследствии потребует работ по восстановлению ряда данных [11]. Расположен пост в 3 км выше гидроствора ГС-1 и в 1,3 км выше входного створа участка моделирования. Исходя из расположения гидрологического поста ГП, значения уровней воды и расходов можно будет непосредственно переносить во входной створ модели (для уровней с учетом уклона водной поверхности) и использовать в качестве граничных условий.

Стратегия моделирования, в части граничных условий, будет основываться на создании модельного гидрографа уровней воды или расходов в верхнем створе. Для данной цели запланированы режимные наблюдения за расходами и уровнями по гидроствору ГС-2, а также измерения уклонов водной поверхности от гидропоста (ГП) до гидроствора ГС-2 в разные фазы водного режима.

Наблюдения за ледовыми явлениями (рис.3) необходимы, чтобы перед началом этапа моделирования хорошо представлять характер их развития. В том случае, если имеют место факторы заторообразования, участки образования заторов должны быть зафиксированы на местности и при калибровке модели в этих областях будут подбираться отличные от табличных коэффициенты шероховатости, чтобы учесть влияние затора в двумерной модели.

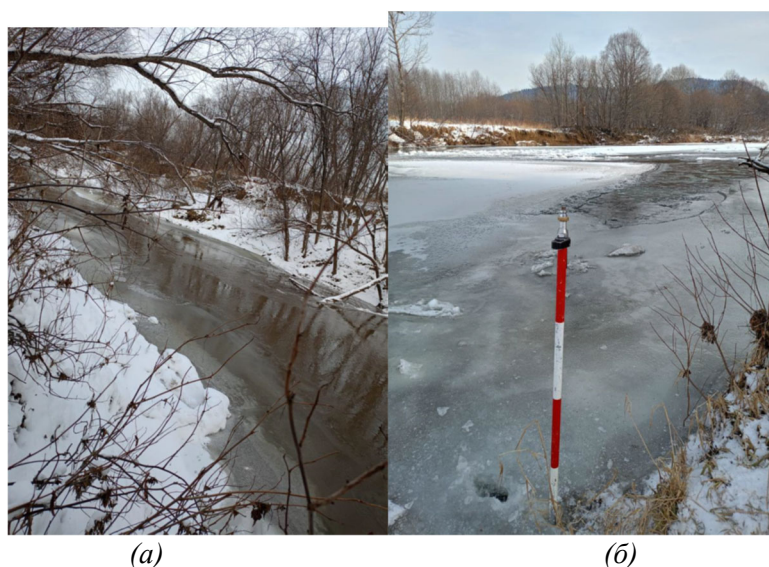


Рис. 3. Визуальные наблюдения за ледовыми явлениями на моделируемом участке р.Углегорка – забереги (а) и процесс установления ледостава (б) осенью.

Опрос местных жителей или сотрудников предприятия должен быть запланирован при наличии такой возможности (если район исследований обитаем). В случае исследуемого участка р.Углегорка подобный опрос будет организован как из числа жителей ближайшего с.Краснополье, так и среди сотрудников угледобывающего предприятия, указанные сведения должны быть зафиксированы на местности при помощи геодезического оборудования.

Результаты

На примере подготовительных работ по моделированию участка р.Углегорка в моделирующей системе НЕС-RAS 6.5 намечен метод планирования объемов полевых работ на начальной стадии, он представлен в табличной форме ниже (табл.1).

Таблица 1

Виды и объемы необходимых полевых работ в зависимости от типа граничных условий модели

Тип выбираемых граничных условий		
№1	№2	№3
Необходимые полевые работы		
1. Топографическая съемка моделируемого участка + 1-2 длины участка ниже выходного створа	1. Топографическая съемка только моделируемого участка	1. Топографическая съемка только моделируемого участка
2. Нивелирование продольных уклонов водной поверхности от ГП до ГС-2 (который будет смещен на 1-2 длины участка)	2. Нивелирование продольных уклонов водной поверхности от ГП до ГС-2	2. Нивелирование продольных уклонов водной поверхности от ГП до ГС-2
3. Организация режимных наблюдений за расходами и уровнями воды на ГС-1 и ГС-2 в течении, как минимум, годового периода	3. Организация режимных наблюдений за расходами и уровнями воды на ГС-1 и ГС-2 в течении, как минимум, годового периода	3. Организация режимных наблюдений за расходами и уровнями воды на ГС-1 и ГС-2 в течении, как минимум, годового периода
4. Организация визуальных и, при необходимости, инструментальных наблюдений за ледовым режимом	4. Организация визуальных и, при необходимости, инструментальных наблюдений за ледовым режимом	4. Организация визуальных и, при необходимости, инструментальных наблюдений за ледовым режимом
5. Организация опроса местных жителей или сотрудников предприятия	5. Организация опроса местных жителей или сотрудников предприятия	5. Организация опроса местных жителей или сотрудников предприятия
6. Определение коэффициентов шероховатости при рекогносцировочном обследовании и их картирование	6. Определение коэффициентов шероховатости при рекогносцировочном обследовании и их картирование	6. Определение коэффициентов шероховатости при рекогносцировочном обследовании и их картирование

Как видно из таблицы 1, объем работ для выбранных граничных условий №№ 2-3 является идентичным, а граничные условия по типу №1 для рассматриваемой ситуации являются неприемлемыми ввиду достаточно значительных объемов по дорогостоящей топографической съемке, которую нужно будет выполнить, чтобы данный метод работал корректно и давал точные результаты.

Заключение и обсуждение

Единого рецепта для всех ситуаций не существует и в каждом отдельном случае специалист, который занимается моделированием, должен исходить, во-первых, из поставленных перед ним задач, во-вторых, определить инструмент моделирования – моделирующую систему, коих на сегодняшний день существует множество, как коммерческих, так и бесплатных, а в-третьих, четко осознавать необходимые силы и средства, которые нужно будет затратить изыскательской организации для решения поставленной задачи.

При планировании полевых работ необходимо, в первую очередь, учитывать возможности используемой моделирующей системы, и еще на предварительном этапе определиться с будущей стратегией моделирования, от нее будет зависеть объем полевых изысканий.

Также, необходимо уделять особое внимание проведению качественного предварительного сбора исходных данных и материалов изысканий и исследований прошлых лет, могущих помочь в создании модели, в том числе поиск и оценку глобальных цифровых моделей рельефа на исследуемую территорию, сбор архивной гидрометеорологической информации по гидрологическим постам системы Росгидромет или иным ведомственным постам, запрос имеющихся данных у заказчика работ.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю Земцову Валерию Алексеевичу, профессору кафедры гидрологии Национального Исследовательского Томского Государственного Университета, за помощь и консультации при написании данной публикации.

Настоящая публикация использует материалы работ, выполняемые автором по заказу ООО "Восточная Горнорудная Компания" (пгт. Шахтерск). В связи с этим, автор благодарит руководство компании за предоставленную возможность работать над данным проектом и разрешение на использование материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алабян А. М., Крыленко И. Н., Лебедева С. В., Панченко Е. Д. Мировой опыт численного моделирования динамики потока в устьях рек // Водные ресурсы. – 2022. – Том 49. – № 5. – С. 552-567.
2. Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г. Исследования в области динамики потоков, стока наносов и русловых деформаций на сибирских реках методом компьютерного моделирования // Тридцатое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. доклады и краткие сообщения. Межвузовский научно-координационный совет по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ. – 2015. – С. 59-72.
3. Земцов В.А., Вершинин Д.А., Инишев Н.Г. Имитационное моделирование заторов (на примере р. Томь, Западная Сибирь) // Лёд и Снег. – 2014. – № 3 (127). – С. 59-68.
4. Беликов В. В., Алексюк А. И., Борисова Н. М., Васильева Е. С., Глотко А. В. Опыт численного гидродинамического моделирования протяженных участков рек // Водные ресурсы. – 2023. – Том 50. – № 4. – С. 367-384.

5. Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии : Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова / СПб. гос. ун-т ; [под ред. О.М. Макарьевой]. Санкт-Петербург : Изд-во Научное, 2018. – 982 с. URL : <http://publishing.intelgr.com/archive/hydrology-facets.pdf>.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 18. Дальний Восток. Выпуск 4. Сахалин и Курилы. – Л : Гидрометеиздат, 1973 г. – 263 с.
7. Беликов В.Е., Католикова Н.И. Водный режим как фактор руслоформирования (на примере рек Сахалина) // Метеорология и гидрология. – 2008. – №1. – С.90-97.
8. US Army Corps of Engineers. HEC-RAS River analysis system. 2D Modeling user's manual. Version 5.0., 2016. – 171 p.
9. US Army Corps of Engineers. HEC-RAS Hydraulic Reference Manual. Version 6.0 Beta, 2020. – 520 p.
10. Two-Dimensional Hydraulic Modeling for Highways in the River Environment. Reference Document – 2019: Reference document / U.S. Department of transportation Federal Highway Administration., 2019.
11. СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Введ. 12.10.2023. М.: Минстрой России, 2023. – 118 с.

© *Р. В. Романовский*, 2025

В. В. Сказка^{1✉}, А. С. Сердюков¹, А. В. Азаров¹

О построении целевых функционалов с использованием преобразования Стоквелла при решении обратных задач геофизики.

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vskazka@gmail.com

Аннотация. Сейсмические методы активно применяются при решении задач контроля состояния горных пород и подземных сооружений. При этом, основная часть предлагаемых подходов ориентирована на использовании объемных волн. Однако, обычно трактуемые как помехи, поверхностные волны несут до 75% волнового поля вблизи границы. И можно попытаться использовать фазовые характеристики поверхностных волн для решения обратных задач с целью определения скорости поперечных волн вблизи границы. В работе рассматривается возможность использования одного целевого функционала, полученного с использованием S-преобразования, для решения обратной задачи восстановления свойств среды вблизи границы шахт и штолен. Основное его отличие от обычно рассматриваемых состоит в том, что там комплексно используется как фазовая скорость, так и групповая. Показано, что несмотря на то, что этот функционал и сам является «приближенным», задача его минимизации вполне решает обратную задачу в простейших случаях.

Ключевые слова: поверхностные волны, фазовая скорость, групповая скорость, целевой функционал, обратная задача

V. V. Skazka^{1✉}, A. S. Serdyukov¹, A. V. Azarov¹

On constructing objective functionals using the Stockwell transform when solving inverse problems of geophysics.

¹Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vskazka@gmail.com

Abstract. Seismic methods are actively used to solve problems of monitoring the state of rocks and underground structures. At the same time, the main part of the proposed approaches is focused on the use of volumetric waves. However, surface waves, usually treated as interference, carry up to 75% of the wave field energy near the boundary. And one can try to use the phase characteristics of surface waves to solve inverse problems in order to determine the velocity of transverse waves near the boundary. The paper considers the possibility of using one target functional obtained using the S-transformation to solve the inverse problem of restoring the properties of the medium near the boundary of mines and adits. Its main difference from those usually considered is that both the phase velocity and the group velocity are used in it. It is shown that despite the fact that this functional itself is "approximate", the problem of its minimization completely solves the inverse problem in the simplest cases.

Keywords: surface waves, phase velocity, group velocity, objective functional, inverse problem

Введение

Целью данной работы является исследование возможности одного из подходов для решения обратных задач, с целью определения параметров среды вблизи шахт и штолен. И продолжает исследования в данном вопросе, начатые в [1-2].

S-преобразование это одно из «оконных преобразований Фурье». См. [3-5] В геофизики оно может быть использовано, в частности, для построения т.н. $f - k$ спектров сейсмограмм [5], на основании которых можно будет получить фазовые скорости поверхностных волн. Этот подход, анализа $f - k$ спектров, как и терминология, взяты из анализа сейсмограмм путем двумерного преобразования Фурье измеренных сейсмограмм. $f - k$ спектры, в свою очередь, позволяют сделать те или иные заключения о среде, в которой эти волны распространяются. В данной работе рассматривается способ использовать некоторые, обычно сами по себе не используемые данные, полученные при построении $f - k$ спектров, для решения обратных задач. Чтобы отличать 'спектры, полученные при применении S-преобразования, будем обозначать их $Sf - k$ спектрами.

Построение функционала. 1 Функции.

S-преобразование временного сигнала $g(t)$ имеет следующий вид

$$S[g(\cdot)](t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) e^{-\frac{f^2(t-\tau)^2}{2\sigma^2}} e^{-i2\pi f\tau} d\tau. \quad (1)$$

Здесь σ некоторый параметр, отвечающий за «ширину окна».

В [5] для построения $Sf - k$ спектров применялась следующая схема. Пусть у нас в каждой точке по оси z наблюдается сигнал $g(z, t)$. Обозначим $G(z, t, f) = S[g(z, \cdot)](z, t, f)$. Если $g(z, t)$ запись прохождения поверхностной волны, то известно следующее соотношение [4]

$$G(z + l, t, f) = e^{-i2\pi k(f)l} e^{-\lambda(f)l} G(z, t - k'(f)l, f) \quad (2)$$

Здесь $k(f)$ - волновое число. $\lambda(f)$ - частотно зависимый параметр затухания. Собственно, это приближенная формула, полученная в предположении, что $k''(f)$ мало.

И далее, обозначим

$$\Omega(u, f, k) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} G(z, \frac{z}{u}, f) e^{2\pi z k} dz \right| \quad (3)$$

Тогда $Sf - k$ спектр описывается функцией

$$P(f, k) = \max_u \Omega(u, f, k) \quad (4)$$

Пусть максимум в (4) достигается в некоторой точке

$$U(f, k) = \arg \max_u \Omega(u, f, k) \quad (5)$$

Из (2) следует, что в простейших случаях сигнала, типа бегущей волны, когда отсутствует дисперсия волны (или дисперсия мала), Ω из (3) будет достигаться, когда u - групповая скорость (или не сильно отличается от групповой скорости).

Построение функционала. 2 Обратная задача.

Рассмотрим модель среды вне штольни. Это будет область $V = \{(x, y, z) | r^2 \equiv x^2 + y^2 > r_0^2, z \in (-\infty, \infty)\}$ - внешность бесконечного цилиндра. Считаем, что параметры среды будут цилиндрически симметричны. Пусть в ней происходит волновой процесс, также цилиндрически симметричный. И мы меряем волновое поле на границе цилиндра - $g(z, t)$.

Считаем, что в полном волновом поле главную часть составляют поверхностные волны. Причем их свойства в основном зависят от свойств среды под точкой наблюдения (при фиксированном z). Это приводит нас к следующему постановке обратной задачи.

По функции $g(z, t)$ строим функцию $U(f, k)$ из (5).

Рассмотрим модель среды с кусочно-постоянными параметрами. Не зависящими от z . Мы будем считать плотности постоянными и не искать их. Таким образом, параметрами среды будут V_P, V_S - скорости продольных и поперечных волн. А также линии разрыва коэффициентов $R = \{r = r_i, i = 1, \dots, n\}$, на которых мы будем предполагать, что соответствующие напряжения и смещения равны. Решение уравнений Ламе будем искать в виде $V(r) \exp(i2\pi(ft - kz))$. Это приведет нас к задаче

$$L\left(r, f, k, \frac{d}{dr}\right)V = 0 \quad (6)$$

Здесь мы через L обозначили соответствующий дифференциальный оператор, вместе с соответствующими условиями на разрывах. Точный вид этих уравнений в данном случае не слишком важен, так как мы не обсуждаем решение задачи (6). Для уравнения (6) ставится задача: при каждом f найти такие $k(f)$, что (6) имеет нетривиальное решение. При этом $\frac{f}{k(f)}$ - фазовая скорость волны, а $\left(\frac{dk}{df}\right)^{-1}$ - групповая скорость. В отличие от задач в полупространстве, когда рассматривается внешность цилиндра, существует нижняя граница f при которой существуют волновые числа $k(f)$ и задача (6) имеет нетривиальное решение. .

Известно, что фазовые скорости поверхностных волн мало зависят скоростей продольных волн. Поэтому, при решении обратных задач, мы будем предполагать, что $V_P = \sqrt{3}V_S$. Тем самым наша среда описывается с помощью R и $V = \{V_S^i, i = 1, n+1\}$ - скоростями в слоях: $V_S(r) = V_S^i, r_{i-1} < r < r_i$, $V_S(r) = V_S^{n+1}, r > r_n$ Рассмотрим следующий функционал

$$\Phi(V, R) = \int_{f_1}^{f_2} \left[\left(\frac{dk(f)}{df} \right)^{-1} - U(f, k(f)) \right]^2 df. \quad (7)$$

С учетом того, что у нас используется дискретное преобразование Фурье, в (7) интеграл – это конечная сумма, а $U(f, k) = (u(f_i, k_j))$ - матрица. Сам функционал можно было бы определить и таким образом, но с учетом того, что мы планируем вычислять вторые производные от функционала, окончательный вид функционала, исследуемого в статье, следующий:

$$\Phi(V, R) = \sum_{i=1}^{N_f} \left[\left(\frac{dk(f_i)}{df} \right)^{-1} - SU_{f_i}(k(f_i)) \right]^2 \quad (8)$$

где $SU_{f_i}(\cdot)$ - кубический сплайн, проходящий через точки $u(f_i, k_j)$.

Конечно, (8) не единственный тип функционала, минимизация которого может дать возможность определить структуру среды при таком подходе. Так, вместо (7) можно рассмотреть, например, следующий функционал:

$$F(V, R) = - \int_{f_1}^{f_2} P(f, k(f)) df, \quad (9)$$

где P определена в (4). Из-за ограниченности места мы не обсуждаем этот подход.

Обратная задача. Некоторые результаты.

1. Однородная среда.

В качестве данных для решения обратных задач брались синтетические сейсмограммы, построенные с помощью свободно распространяемого пакета SPECSEM2D (<https://github.com/SPECSEM/specsem2d>). Во всех случаях в качестве r_0 (радиуса цилиндра – «граница штрека») бралась равной 2.5м. Во всех расчетах было 1300 приемников, расстояние между ними 0.2м, дискретизация по времени 10^{-4} с. При построении матрицы $U(f, k) = (u(f_i, k_j))$ использовались данные от 100 рядом стоящих приемников. И этим окном по приемникам пробегали весь профиль. Результат соотносили с точкой посередине окна. В представления функционала (8) суммирование проводилось от 250гц до 800гц с шагом 10/3гц.

Для первого примера выберем однородную модель. Скорости в среде:

$V_P=2800$ м/с, $V_S=1700$ м/с. На рис. 1 показана часть сейсмограммы.

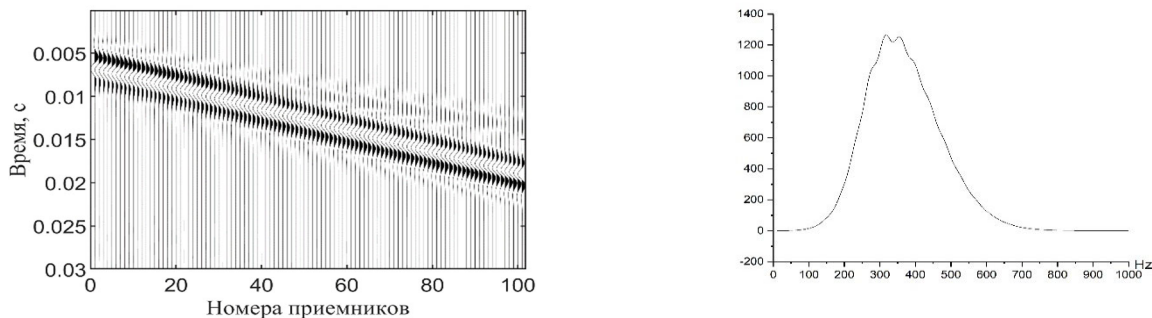


Рис. 1. Сейсмограмма и амплитудный спектр сейсмограммы

Результат минимизации функционала (8) следующий. Мы считали, что среда однородна. И минимум достигался при $V_S=1693\text{м/с}$. Само же поведение групповой скорости и матрицы U отражено на следующем графике.

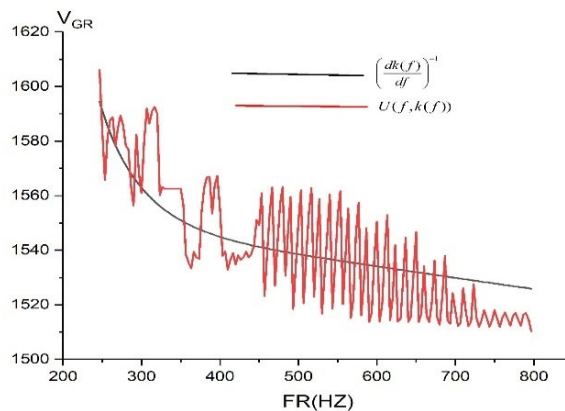


Рис. 2. Поведение компонент функционала (8) в точке минимума

Несколько пояснений к графику. «Пилообразность» функции $U(f, k(f))$ является следствием того, что минимум функции (3) искался с определенным шагом. Относительная разность же этих двух величин не более 5%. Заметим, что функционал (8) в принципе не может быть равен нулю (дисперсия поверхностных волн существует).

2 Слоисто-неоднородная среда.

В качестве второго примера мы возьмем среду, данные для расчета прямой задачи которой и сейсмограмма представлены на следующем рисунке. Амплитудный спектр мы не приводим, он также имеет 400Гц несущей частотой.

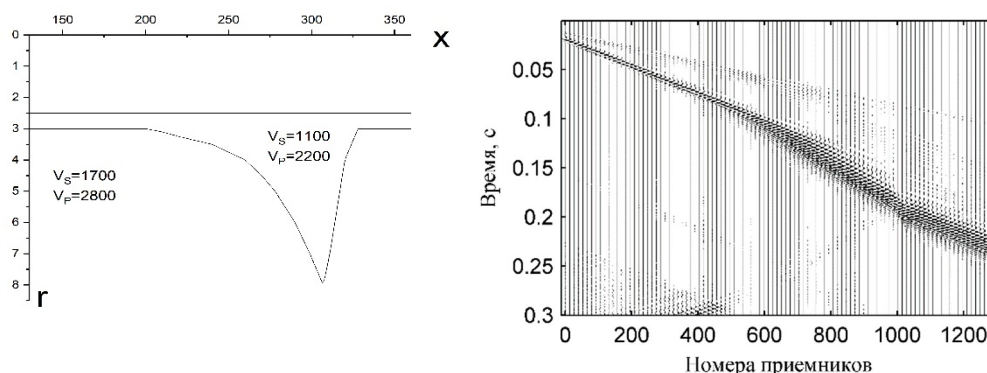


Рис. 3. Модель среды и сейсмограмма

Как говорилось ранее, обработка сейсмограммы шла в скользящем окне, захватывая сто трасс. После окно сдвигалось на метр и опять производилась мини-

мизация функционала (8). Результаты привязывались к точке, расположенной в середине окна. Для минимизации функционала мы выбрали двуслойную модель. Начальные данные, с которых стартовала минимизация, брались из результатов минимизации на предыдущем шаге. Мы приведем два результата. Это линия раздела среды и обобщающий параметр среды вблизи границы. А именно, мы приведем среднюю скорость волны V_S под данной точкой до глубины, составляющей 0.9 от длины волны, движущейся с этой средней скоростью, на несущей частоте сигнала. В нашем случае это 400гц.

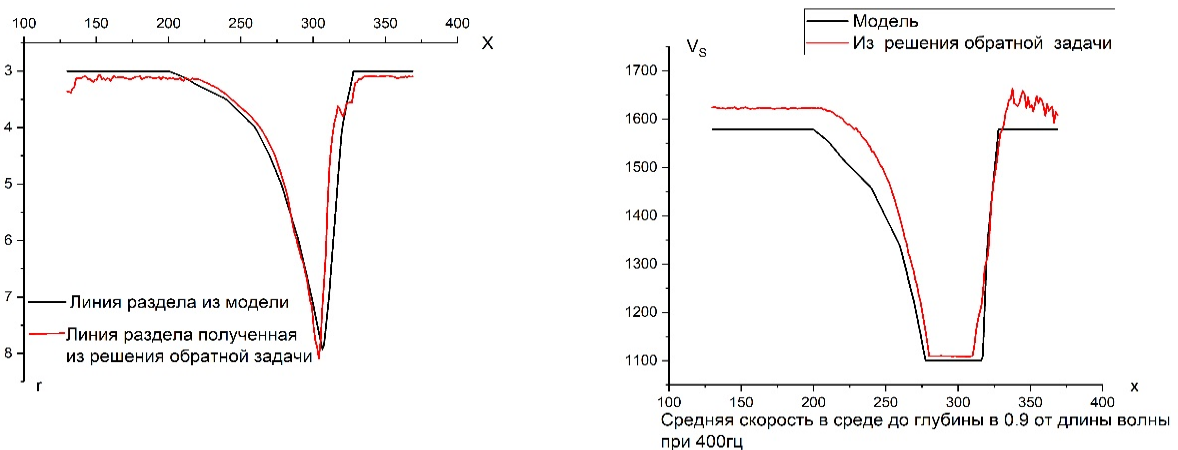


Рис.4. Результаты обработки сейсмограммы из рис. 3

Также, для иллюстрации приведем графики групповой скорости и матрицы $U(f, k(f))$ вычисленных в точке 260м на профиле. А также графики групповых (V_{GR}) и фазовых (V_{PH}) скоростей, полученных из решения обратной задачи и из модели. Под последним мы понимаем фазовые и групповые скорости, полученные в среде, параметры которой совпадают с параметрами модели строго под точкой наблюдения.

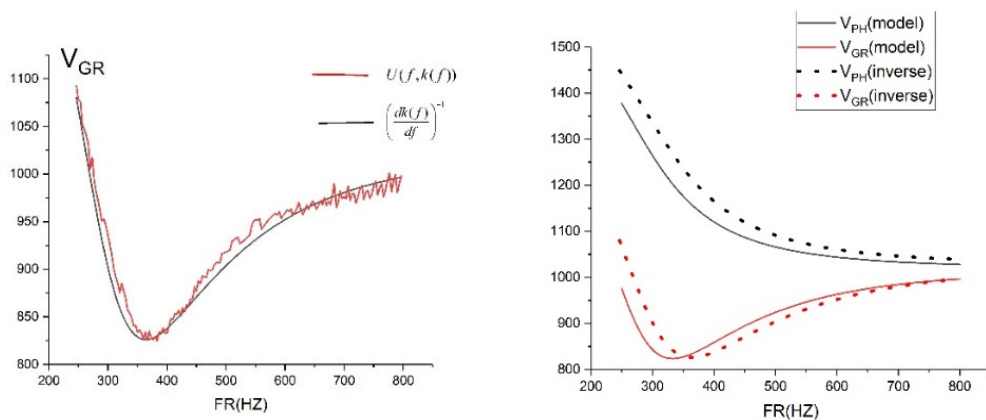


Рис. 5 Поведение компонент функционала (8) в точке минимума и сравнение данных, полученных из решения обратной задачи с аналитическими.

Заключение

Если мы хотим получить параметры поверхностных волн, не располагая приемниками, используемыми в сейсмологии, на достаточно редкой сети приемников, мы с необходимостью приходим к использованию того или иного варианта многоканальной обработке сейсмограмм, по типу S-преобразования. Обычно, в обратных задачах сейсмологии нахождение линий раздела слоев – достаточно неустойчивая процедура. Оказывается, что при минимизации использованного в статье функционала, линии раздела определяются четче, чем скорости. Это позволяет надеяться на то, что применение данного подхода при комплексной обработке сейсмограмм позволит лучше определить структуру среды вблизи свободной границы.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 121052500138-4, код (шифр) научной темы FWNZ-2021-0001)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М. В., Сказка В. В., Азаров А. В., Сердюков А. С., Патутин А. В. Использование поверхностных волн для мониторинга состояния пород вокруг горных выработок и сооружений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 6. — С. 3—14. DOI: 10.15372/FTPRPI20220601.
2. Сказка В. В., Курленя М. В. Азаров А. В., Сердюков А. С. Локация неоднородностей в окрестности горной выработки по фазовой скорости поверхностной сейсмической волны, Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, №5 стр. 3-11, 2024г, DOI: [10.15372/FTPRPI20240501](https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240501)
3. Stockwell, R. G., L. Mansinha, and R. Lowe Localization of the complex spectrum: The S transform: IEEE Transactions on Signal Processing. — 1996. - V. 44. — P. 998–1001. doi: 10.1109/78.492555
4. Askari, R., and R. J. Ferguson, 2012, Dispersion and the dissipative characteristics of surface waves in the generalized S-transform domain: Geophysics, 77. - No. 1. - V11–V20. doi: 10.1190/geo2010-0330.1
5. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A, Azarov A.V., Baranov V.D. Slant f - k transform of multichannel seismic surface wave data. // Geophysics. 2019.- Vol. 84. - No. 1 - P. a19–a24. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0430.1>

© В. В. Сказка, А. С. Сердюков, А. В. Азаров, 2025

А. Ю. Танакова^{1✉}, И. Е. Васильева¹

**Динамика поступления консервативных примесей
с водосборов малых рек урбанизированных территорий
(на примере реки Барнаулки)**

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН,
г. Барнаул, Российская Федерация
e-mail: a.u.goponenko@mail.ru

Аннотация. В работе исследовано диффузное загрязнение малой городской реки Барнаулки консервативными примесями (тяжелые металлы, сульфаты, хлориды). Выполнен анализ пространственного распределения микро- (Li, Ti, Al, Mn) и макрокомпонентов (Cl^- , SO_4^{2-}) на 10-километровом участке реки в черте г. Барнаула. Отбор проб (30 точек) проводили в июле 2024 г. с последующим анализом методом ICP-MS и ионной хроматографии. Выявлены закономерности трансформации загрязняющих веществ под влиянием природных и антропогенных факторов. Установлено, что особенности гидрохимического режима реки определяются как естественными процессами (выщелачивание из почв, окислительно-восстановительные реакции), так и интенсивным антропогенным воздействием (городские стоки, промышленные сбросы). Полученные данные имеют практическое значение для разработки системы мониторинга и мероприятий по охране малых рек в условиях урбанизированных территорий.

Ключевые слова: диффузное загрязнение, консервативные примеси

A. Yu. Tanakova^{1✉}, I. E. Vasilyeva¹

**The Dynamics of conservative impurities inflow
from the watershed area of small rivers in urbanized territories
(case study of the Barnaulka River)**

¹Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS,
Barnaul, Russian Federation
e-mail: a.u.goponenko@mail.ru

Abstract. The paper investigates diffuse pollution of the small urban Barnaulka River by conservative impurities (heavy metals, sulfates, chlorides). The spatial distribution analysis of micro- (Li, Ti, Al, Mn) and macrocomponents (Cl^- , SO_4^{2-}) was conducted on a 10-kilometer river section within the city of Barnaul. Sampling (30 points) was performed in July 2024, followed by analysis using ICP-MS and ion chromatography. Patterns of pollutant transformation under the influence of natural and anthropogenic factors have been identified. It has been established that the specific features of the river's hydrochemical regime are determined by both natural processes (leaching from soils, redox reactions) and intense anthropogenic impact (urban runoff, industrial discharges). The obtained data are of practical significance for developing a monitoring system and protection measures for small rivers in urbanized areas.

Keywords: diffuse pollution, conservative impurities

Введение

Диффузное (рассеянное) загрязнение водных объектов представляет собой значительную экологическую проблему, особенно в урбанизированных и сельскохозяйственных районах. В отличие от точечных источников, таких как промышленные сбросы, диффузное загрязнение формируется за счет множества рассредоточенных поступлений загрязняющих веществ с территории водосбора. Особую опасность представляют консервативные примеси – устойчивые к разложению вещества, способные накапливаться в воде и донных отложениях, оказывая долгосрочное негативное воздействие на экосистемы [1, 2]. Среди веществ, поступающих в природные воды, можно выделить некоторые виды консервативных примесей: неорганические соли тяжелых металлов, пестициды и синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), входящие в состав синтетических моющих средств (СМС), или детергентов [3, 4]. Малые реки в урбанизированных районах подвержены значительному антропогенному воздействию, что приводит к изменению их гидрохимического режима. Река Барнаулка, протекающая через одноименный город, является типичным примером малой реки, испытывающей нагрузку от промышленных, коммунальных и сельскохозяйственных стоков [5, 6].

Цель работы - изучить динамику поступления консервативных примесей в малую реку урбанизированной территории на примере р. Барнаулка и оценить влияние антропогенных факторов на их накопление в водной экосистеме.

Материалы и методы

Река Барнаулка – левый приток р. Оби, относится по своей длине и площади бассейна к средним рекам, но по расходу воды – это малая река [7]. Приустьевой участок реки длиной 10,1 км находится на территории города Барнаула, площадь водосборного бассейна на территории города – 125,5 км² [8].

Питание реки смешанное, с преобладанием снегового. Гидрологический сток водотоков г. Барнаула формируется за счет талых вод сезонных снегов, дождей и грунтовых вод, при этом доля снегового питания составляет 60–80% стока, дождевого – 5–10%, грунтового – 5–15%. В условиях плотной городской застройки, асфальто-бетонного покрытия тротуаров и транспортных магистралей, засыпки ручейковых долин, а также аккумуляирования мусора в русле рек доля грунтового питания нижнего течения р. Барнаулки сократилась до 1–2 % [8].

Отбор проб на участке р. Барнаулки в черте города Барнаула был выполнен 16 июля 2024 г. Пробы отбирались в 30-ти точках относительно равномерно рассредоточенных по длине участка. Верхняя (по течению реки) точка с номером (идентификатором) 30 располагалась на юго-западной окраине города в районе с малоэтажной (коттеджной) застройкой, нижняя точка с номером 01 – в центральной части города, в 200-х метрах от устья реки. Общая протяженность исследованного участка реки – 10 км (рис. 1).

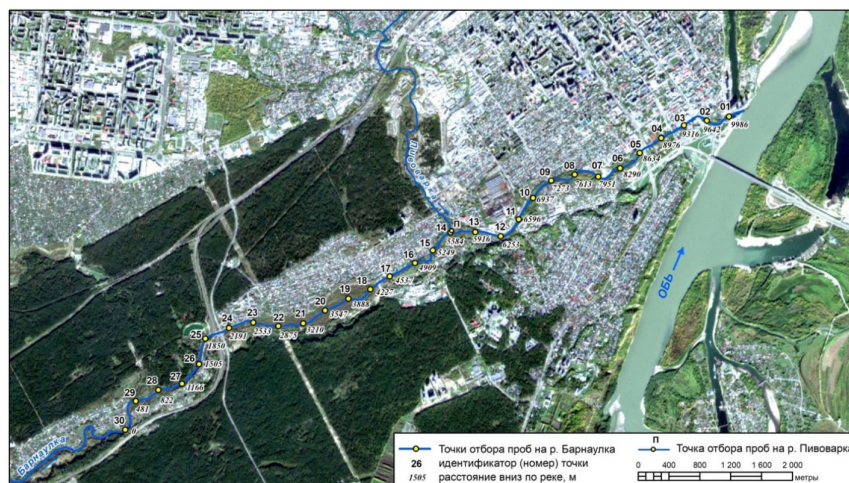


Рис. 1. Картосхема точек отбора проб на р. Барнаулка, 16 июля 2024 г.
Подложка – снимок спутника Sentinel 04.10.2023 г.

Пробы воды отбирали с помощью батометра на штанге (объем 0,5 л) с середины реки на глубине $0,5 h$, где h — глубина реки. Для определения микро- и макрокомпонентного состава использовалась специально подготовленная посуда, которая предварительно трижды ополаскивалась отбираемой пробой воды. В день отбора пробы были доставлены в лабораторию, где в тот же день их консервировали в соответствии с требованиями к определению изучаемых показателей или проводили непосредственную пробоподготовку для последующего анализа.

Для определения ионного состава аликвоты проб природной воды перед анализом фильтровали через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм, используя шприцы и шприцевые фильтр-насадки Minisart NML Plus. Для разбавления проб применяли чистую деионизованную воду, фоновый сигнал по электропроводности которой был менее 1,0 мкСм/см. Для определения валовых форм микрокомпонентов к 50 мл нефilterованной пробы воды добавляли 0,5 мл концентрированной азотной кислоты марки ОСЧ и выдерживали в течение 1 месяца для полного окисления и перехода в раствор определяемых микрокомпонентов.

Определение микрокомпонентов Ti, Li, Al, Mn проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе iCAP-Qc, Termo Fisher Scientific, Германия. Массовые концентрации макрокомпонентов Cl^- и SO_4^{2-} определяли методом ионной хроматографии на приборе ICS-3000 корпорации Dionex.

Результаты

На основании данных, полученных при анализе проб, были построены линейные диаграммы, отображающие содержание микро- и макроэлементов в зависимости от мест отбора. Это позволило проследить закономерности изменения концентраций химических элементов вдоль всего исследуемого участка реки.

При приближении к городской территории и росте доли асфальтового покрытия наблюдалось монотонное снижение концентраций таких типично почвенных элементов, как Li и Ti (рис. 2, 3).

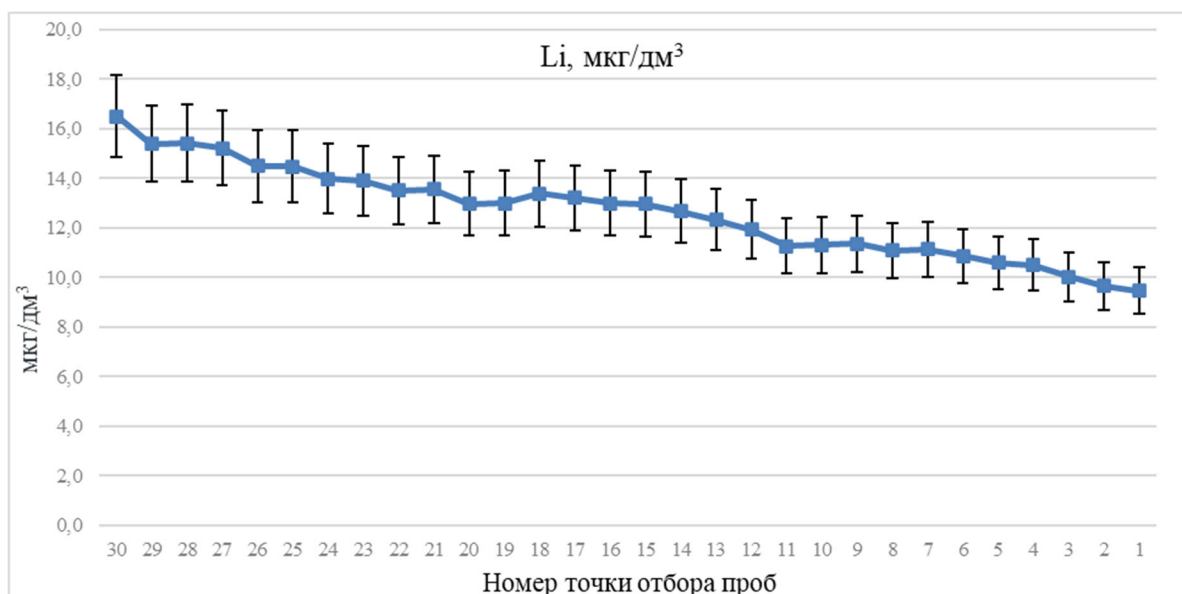


Рис. 2. Динамика изменения величины концентрации лития в р. Барнаулке на участке исследования

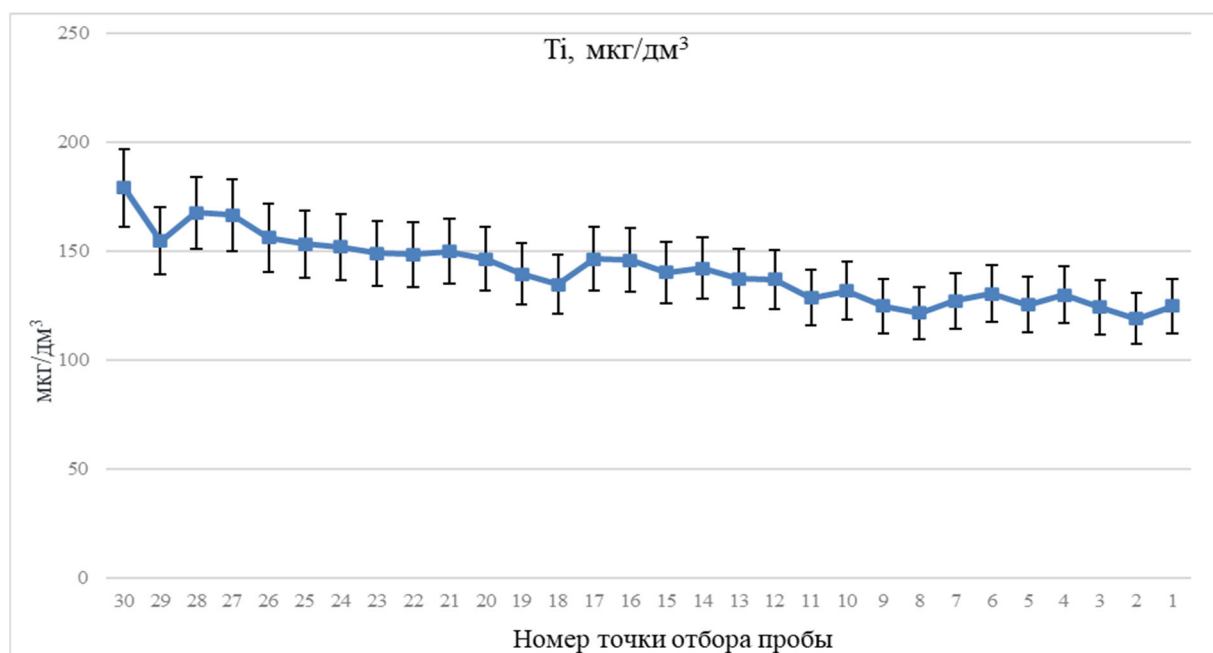


Рис. 3. Динамика изменения величины концентрации титана в р. Барнаулке на участке исследования

На графике (рис. 4) видно, что содержание сульфатов и хлоридов сначала падает на участке 19, а затем постепенно увеличивается ближе к устью реки Барнаулки.

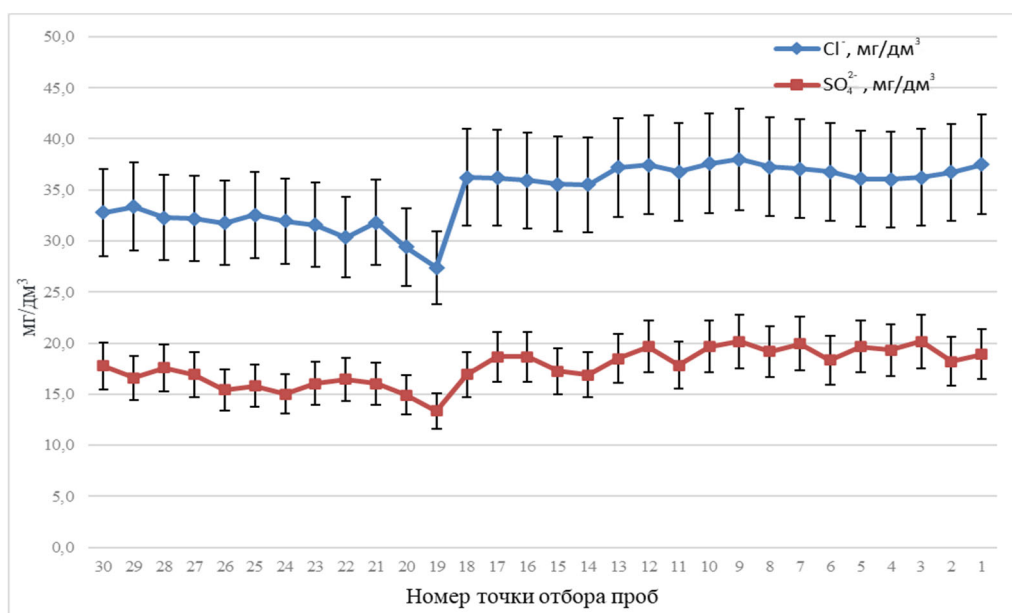


Рис. 4. Динамика изменения величины концентрации хлорида и сульфата в р. Барнаулке на участке исследования

Проведенные исследования выявили закономерности в распределении алюминия и марганца в реке Барнаулке (рис.5). Наибольшие концентрации алюминия обнаружены в точках 27, 23, ниже дамбы (точка 17) и в месте впадения реки Пивоварки (точка 14), а также в точке, приближенной к устью. Уровень марганца снижается до точки отбора №9, затем наблюдается возрастание при приближении к устью реки.

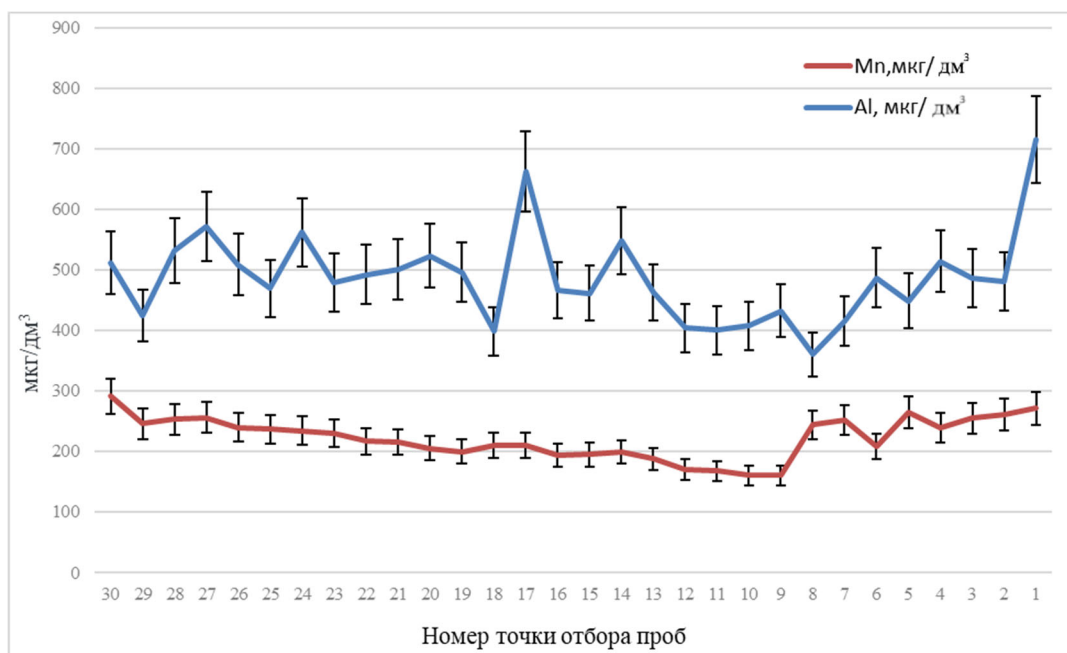


Рис. 5. Динамика изменения величины концентрации алюминия и марганца в р. Барнаулке на участке исследования

Обсуждение

Данная тенденция (рис. 2, 3) указывает на снижение поступления Li и Ti с подстилающей поверхности из-за преобладания асфальтированных участков в городской черте. Отсутствие выраженных пиков концентраций позволяет предположить, что урбанизированная среда не оказывает значительного влияния на загрязнение данными поллютантами.

Снижение концентраций кальция и сульфатов на участке 19 (рис.4) коррелирует с уменьшением антропогенной нагрузки вследствие удаления от транспортных магистралей и жилых районов. В точке 18 фиксируется повышение значений, отражающее влияние урбанизированной среды. Дальнейший рост концентраций можно объяснить комплексом антропогенных факторов, включая поверхностный сток, хозяйственно-бытовые сбросы и работу дренажных систем.

Повышение концентраций алюминия в водной среде может быть обусловлено несколькими факторами. Во-первых, источником могут служить глинистые почвы водосборного бассейна, а также поступление кислых стоков, которые при низких значениях pH (менее 5,5) способствуют переходу алюминия в растворимую форму (Al^{3+}). В приустьевой части реки увеличение содержания алюминия может объясняться аккумуляцией взвешенных частиц, а также антропогенным воздействием, в частности, промышленными сбросами [9].

Рост концентраций марганца может быть связан с особенностями гидродинамики и окислительно-восстановительными условиями. В зонах с замедленным течением и при поступлении органических загрязнений (например, со сточными водами) формируются бескислородные условия, способствующие переходу марганца в более растворимые формы. При приближении к устью реки дефицит растворенного кислорода приводит к восстановлению Mn^{4+} до Mn^{2+} , что увеличивает его подвижность [10, 11]. Дополнительным фактором являются поверхностные смывы с асфальтированных дорожных покрытий, которые могут содержать значительные количества соединений марганца.

Заключение

Проведенное исследование диффузного загрязнения реки Барнаулки позволило выявить ключевые закономерности в распределении консервативных примесей на урбанизированной территории. Основные изменения касаются пространственного распределения микро- и макрокомпонентов: снижение концентраций Li и Ti в городской черте связано с изолирующим эффектом асфальтовых покрытий, тогда как рост содержания Al обусловлен глинистыми почвами и сточными водами. Особенно заметно увеличение концентраций Mn в устьевой зоне, вызванное восстановительными условиями. Динамика SO_4^{2-} и Cl^- чётко коррелирует с антропогенной нагрузкой.

Установлено, что пространственная динамика химических элементов определяется сложным взаимодействием природных и антропогенных факторов. Полученные данные имеют существенное практическое значение для разработки системы мониторинга диффузного загрязнения и планирования природоохран-

ных мероприятий, особенно с учетом необходимости учета особенностей трансформации загрязняющих веществ в различных гидрологических условиях.

Благодарность

Работа выполнена в рамках реализации и при поддержке гранта РФФИ № 24-27-20023 «Разработка методов оценки расхода консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек (на примере рек Барнаулка, Лосиха Алтайский край)» (<https://rscf.ru/project/24-27-20023/>).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кашутина Е. А., Ясинский С. В., Сидорова М. В. Диффузное загрязнение водных объектов на территории большого города //Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. – 2022. – С. 62-68.
2. Раткович Л. Д. и др. Факторы влияния диффузного загрязнения на водные объекты //Природообустройство. – 2016. – №. 3. – С. 64-75.
3. Рязанцева Л.Т. Загрязнение окружающей среды: источники и последствия: учеб. пособие / Л.Т. Рязанцева. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. – 184 с.
4. Сбойчаков, В. Б. Микробиоценоз сточных вод / В. Б. Сбойчаков, О. В. Решетникова, А. А. Ганичева. - Текст : непосредственный // Актуальная биотехнология. - 2019. - № 3. - С. 521-525. - Библиогр.: 23 назв.
5. Филимонов В. Ю., Ловцкая О. В., Кудишин А. В. Расчет диффузного стока консервативных загрязнителей для водосборов малых равнинных рек на примере реки Барнаулки //Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2023. – №. 3 (70). – С. 61-69.
6. Носкова Т. В. и др. Экологический мониторинг состояния реки Барнаулки по химическим показателям //Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2019. – №. 4 (55). – С. 130-136.
7. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. – Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2001. – 163 с.
8. Балацкая И. А., Швецов А. Я., Ревякин В. С., Гатилов Ю. А. Город Барнаул на рубеже XX и XXI столетий. Природные условия, экология, экономика, социальная сфера. Монография. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. – 190 с.
9. Носкова Т.В. Оценка влияния городской территории на загрязнение фенолами, формальдегидом и алюминием (III) поверхностных вод на участке бассейна Верхней Оби в районе г. Барнаула : диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.27 / Носкова Татьяна Витальевна; [Место защиты: Ин-т вод. и экол. проблем СО РАН]. - Барнаул, 2017. - 119 с. : ил.
10. Огрызкова О. С. и др. Сезонные изменения содержания марганца в воде Новосибирского водохранилища //Известия Алтайского государственного университета. – 2014. – Т. 2. – №. 3. – С. 176-180.
11. Папина Т. С. и др. Пространственно-временные закономерности распределения растворенных и взвешенных форм марганца в воде Новосибирского водохранилища //Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44. – №. 2. – С. 201-208.

© А. Ю. Танакова, И. Е. Васильева, 2025

А. С. Хорунженко^{1✉}, Ан. Г. Марчук²

Расчёт цунами в больших областях методом декомпозиции сетки

¹Институт автоматизации и электрометрии СОРАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СОРАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.khorunzhenko@g.nsu.ru

Аннотация. Современные многопроцессорные вычислительные системы позволяют существенно ускорять процесс численного моделирования распространения цунами с учетом подводного рельефа и глубины водоема. Это даёт возможность в оперативном режиме оценивать ожидаемую высоту волны вдоль побережья, а также потенциальные зоны затопления сразу после сейсмического события. Основным ограничением в таких расчётах является недостаточный объём доступной оперативной памяти, особенно в ситуациях, когда требуется рассматривать крупные акватории на детализированной сетке. В данной статье описывается метод декомпозиции исходной расчётной области на несколько вспомогательных подобластей меньшей площади, что даёт возможность наиболее эффективно использовать даже ограниченные вычислительные ресурсы. Предлагаемый подход позволяет получить детальное распределение высоты волны вдоль побережий и оценить зоны затопления без привлечения суперкомпьютеров.

Ключевые слова: расчёт цунами, разбиение области, производительность, моделирование мелкой воды

A. S. Khorunzhenko^{1✉}, An. G. Marchuk²

Calculation of tsunami wave propagation using domain decomposition

¹Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

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

Abstract. Leveraging modern multiprocessor computing systems can greatly accelerate the calculation of tsunami wave propagation, enabling rapid estimation of expected wave heights along the shore and identifying potential inundation zones immediately following a seismic event. However, the limited memory capacity of current hardware constrains the ability to perform high-resolution calculations quickly. In this paper, we propose a grid-partitioning strategy that divides a large computational domain into smaller sub-grids, thereby facilitating prompt determination of inundation areas and detailed assessment of expected wave heights while operating on limited computational resources. This approach allows for precise modeling in specific regions, even when using a standard personal computer.

Keywords: tsunami wave calculation, domain decomposition, performance gain, shallow water modeling

Введение

Благодаря прогрессу в вычислительной математике, компьютерных технологиях и системах мониторинга водной поверхности стало возможным сравнительно быстро моделировать распространение волн в океане, в том числе цунами, используя современные вычислительные комплексы [1–3]. Однако важнейшей задачей остаётся достижение необходимой детализации результатов при ограниченных объёмах оперативной памяти (ОЗУ). Это критично для оперативного прогноза высот волн и зон затопления прибрежных территорий, где цунами может представлять серьёзную опасность.

Если рассматривать крупную область океана с сеточным шагом порядка сотен метров, то общий размер вычислительных массивов может оказаться настолько велик, что не поместится в доступное ОЗУ даже при использовании мощных серверов. Одним из способов добиться высокой точности в прибрежных районах является метод вложенных сеток [4], однако он усложняется необходимостью задания граничных условий на стыках разной детализации. В данной работе предлагается иная стратегия – разбиение расчётной сетки на несколько перекрывающихся подобластей с последовательной (или параллельной) обработкой. Такой подход снижает требования к оперативной памяти и позволяет при необходимости достаточно детально исследовать побережье, используя даже обычный персональный компьютер (ПК).

Методы и материалы

При моделировании распространения цунами на реальном рельефе дна без учёта трения и силы Кориолиса обычно используют систему нелинейных уравнений мелкой воды [5, 6] вида

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

где H – полная толщина столба воды; η – возмущение свободной поверхности; D – глубина (рельеф дна), заранее известная в каждом узле сетки.

Пусть (u, v) – горизонтальные компоненты скорости потока воды, а g – ускорение свободного падения. Тогда система уравнений может быть записана как:

$$\begin{cases} H_t + (uH)_x + (vH)_y = 0 \\ u_t + uu_x + vu_y + gH_x = gD_x \\ v_t + uv_x + vv_y + gH_y = gD_y \end{cases} \quad (2)$$

Сферичность Земли часто учитывается путём корректировки длины шага сетки по широте ϕ пропорционально $\cos(\phi)$. Для численного решения используется разностная схема МакКормака (MacCormack) [7] с промежуточным слоем по времени. Параллельная реализация описана в ряде работ [8, 9]. Важно, что для хранения всех необходимых данных (уровень воды, скорость на старом, новом и

промежуточном временных слоях, массив глубин и вспомогательные поля) требуется большой объём оперативной памяти.

Если размер домена по долготе и широте велик, а шаг сетки мал, возникает опасность, что на стандартных компьютерах или даже на некоторых серверах все массивы не поместятся в ОЗУ. Поэтому возникает идея разбивать расчётную сетку на несколько подобластей и вычислять волну «по частям», обмениваясь информацией на стыках.

Суть метода разбиения области состоит в том, что весь прямоугольный регион моделирования делится на несколько блоков (например, вертикальные или горизонтальные полосы), каждая из которых чуть перекрывает соседнюю для корректного вычисления производных на границах. Рассмотрим для определённости вертикальное разбиение:

1. первая подобласть содержит n_0 левых столбцов сетки (i, j) размером $n_{\max} \times m_{\max}$;
2. вторая начинается со столбца $n_0 - 1$ и заканчивается на столбце $2n_0$;
3. третья подобласть начинается с $2n_0 - 1$ и т. д.

Такое «перехлёстывание» на 1 столбец обусловлено тем, что в схеме Мак-Кормака для определения значений в столбце n на новом временном слое требуются данные из столбцов $n - 1$, n и $n + 1$. В итоге центральные столбцы каждой подобласти вычисляются по обычной схеме, а «лишний» столбец становится краевым и обменивается с соседней подобластью. Граничные условия (свободные или отражающие) по схеме накладываются только на внешнюю границу всей области (например, западную и восточную при разбиении по x).

После того как в одной подобласти завершён очередной шаг по времени, значения на её правом (или левом) граничном столбце передаются соседней подобласти, чтобы в следующем шаге она могла корректно вычислить свои центральные узлы. Аналогично происходит и в обратную сторону. Таким образом, отпадает необходимость придумывать дополнительные «искусственные» граничные условия на стыках подобластей, поскольку все необходимые данные по факту передаются из соседних зон.

Предложенный подход может быть реализован как в однопоточном режиме (когда блоки рассчитываются поочерёдно), так и в параллельном (каждая подобласть обрабатывается на своём процессоре или узле кластера). В последнем случае выигрыш особенно велик, если число блоков согласовано с количеством вычислительных устройств, позволяя эффективнее загружать систему.

Результаты

Программа численного моделирования распространения цунами на основе нелинейных уравнений мелкой воды (1) реализована на языке C++. Для проверки корректности и эффективности предложенного алгоритма были проведены тестовые расчеты модельных задач. В первом тестовом численном эксперименте круговой очаг цунами радиусом 50 км располагался в центре области размером 1000×1000 км с максимальным смещением водной поверхности в центре, равным

+1 м. Глубина во всей области равнялась 1000 м. Вся область была разделена на 8 вертикальных полос размером 125x1000 км (рис. 1а).

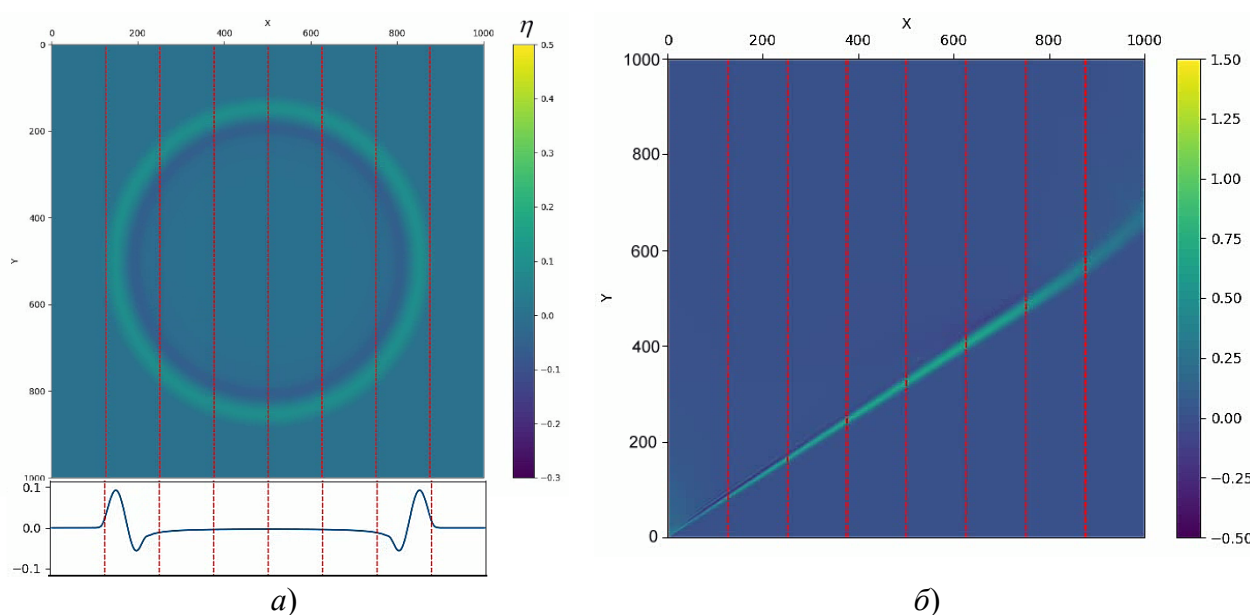


Рис. 1. Поверхность расчетной области. Пунктирными линиями обозначены границы разбиения на подобласти: а) через 1725 с после генерации волны круговым источником. В нижней части показан профиль водной поверхности (в метрах) вдоль линии $y=500$ км, параллельной оси абсцисс. б) над параболическим рельефом дна через 2100 с после начала движения волны от левой границы области.

На рисунке 1б показана водная поверхность через 2100 с после начала процесса. Хорошо видно, что фронт волны остается прямолинейным, что соответствует точному решению для кинематики фронта волны над параболическим рельефом дна [10].

Третий тест проверяет корректность моделирования процесса отражения волны от вертикальной стенки. В данном вычислительном эксперименте волна цунами, распространяющаяся от левой границы расчетной области, отражается от отражающей стенки, ориентированной под углом 45° к нижней границе области. В узлах сетки, моделирующих стенку, накладывается условие полного отражения, суть которого заключается в приравнении нулевой нормальной скорости к отражающей линии. На рис. 2а визуализированы результаты данного расчета, показывающие момент, когда часть фронта волны уже отразилась от стенки.

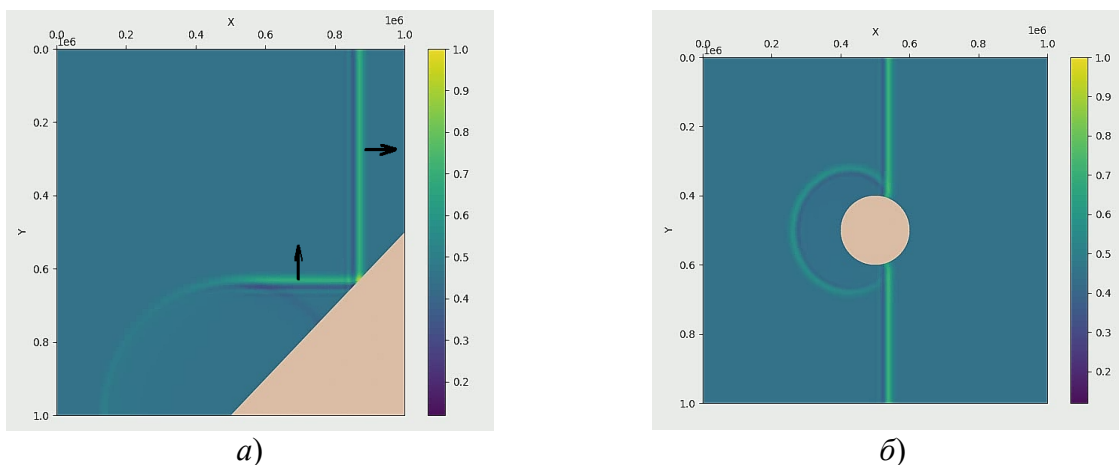


Рис. 2. Отражение плоской волны. а) от наклонной стенки под углом 45° к исходному направлению волны. Часть фронта уже отразилась. б) от кругового острова (радиус 100 км). Отражённая волна подчиняется законам геометрической оптики

Из рисунка 2б видно, что отражение волны происходит по законам геометрической оптики, что согласуется с теоретическими результатами. Таким образом все проведенные тесты подтверждают, что разбиение области на подобласти не вносит погрешностей при корректном обмене информацией между блоками.

Для проверки на реальных данных была выбрана область, включающая в Японское море (от 33.0° до 53.0° с. ш. и от 127.3° до 142.3° в. д.). Батиметрия взята из открытого набора GEBCO-2024 [11] с шагом 0.0041667° , что даёт сетку 3601×4801 узлов. Шаг по времени – 1 с, всего 10 000 шагов (около трёх часов модельного времени). География и рельеф дна расчетной области показаны на рис. 3.

В качестве модельного источника использовалось эллиптическое начальное поднятие поверхности с максимальным подъёмом $\eta_0=2$ м в центре и полуосями $r_1=100$ км, $r_2=25$ км, ориентированными под углом $\alpha=80^\circ$ к параллелям.

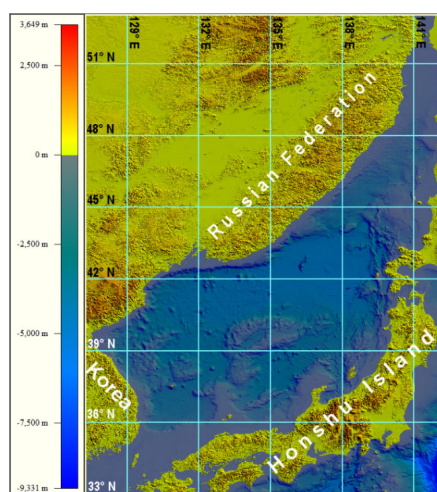


Рис. 3. Визуализация географии и цифровой батиметрии области для численного моделирования, включающей всё Японское море

Пусть (x_0, y_0) – координаты центра источника, а

$$r = \sqrt{\left(\frac{(\cos(\alpha) \cdot x + \sin(\alpha) \cdot y)}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{(\cos(\alpha) \cdot y - \sin(\alpha) \cdot x)}{r_2}\right)^2}. \quad (3)$$

Тогда начальное возмущение можно задать, например, так:

$$\eta(x_0 + x, y_0 + y) = \frac{\eta_0}{2} (1 + \cos(\pi \cdot r)), (0 \leq r \leq 1), \quad (4)$$

где r – параметр, определяющий «крутизну» распределения поднятия внутри эллипса; η_0 – максимальное смещение водной поверхности в центре источника с координатами (x_0, y_0) ; угол α – наклон длинной оси к направлению параллелей.

Трёхмерное изображение начального смещения водной поверхности в описываемом источнике показано на рисунке 4.

После 10 000 с волна достигает значительной части акватории. Расчёты показывают, что основная энергия распространяется к западному побережью Хонсю, к российскому Приморью и к восточным берегам Корейского полуострова.

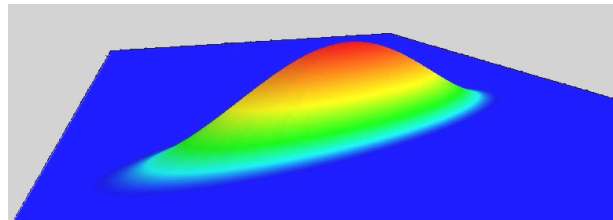


Рис. 4. Трёхмерное представление эллиптического источника (полуоси 100 и 25 км)

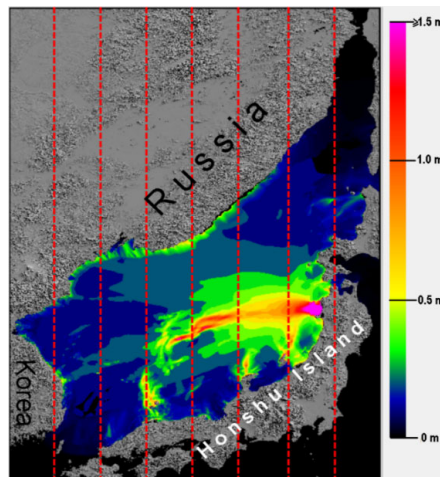


Рис. 5. Распределение максимальных высот цунами (цветом) и линии разбиения области (пунктир) через 10 000 с. Красный цвет означает волны выше 1 м

Благодаря предлагаемому методу разбиения на подобласти (с обменом данными на стыках) удаётся провести столь детализированный расчёт на сравнительно ограниченных ресурсах. На рисунке 5 красным цветом закрашены места, где высота волны превышает 100 см. В частности, это происходит в направлении

префектуры Ниигата, острова Садо и полуострова Ното. Например, максимальная высота волны у побережья полуострова Ното составила 150 см, а у побережья Республики Корея максимальная высота волны составила 120 см. Сравнение результатов без разделения области и с разделением всей области на подобласти подтвердило корректность алгоритма при отсутствии каких-либо негативных эффектов на границах подобластей.

Заключение

Эффективность предлагаемого подхода подтверждена как тестированием на задачах с известными точными решениями, так и на распространении волн на реальной батиметрии. Полученные результаты показали, что использование метода разбиения всей расчетной области на подобласти с последующим расчетом «по частям» позволяет проводить численное моделирование в областях, размер которых превышает возможности ограниченных вычислительных ресурсов.

Кроме того, предлагаемый метод демонстрирует особую полезность при расчетах для областей с высокой детализацией и позволяет концентрировать вычислительные мощности на наиболее критических участках. Это открывает перспективы для оперативного прогнозирования зон затопления и их визуализации даже на персональном компьютере.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке госзаданий ИАЭ СО РАН FWNG-2024-0014 и ИВМиМГ 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. NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112; NOAA: Washington, DC, USA, 1977.
2. Wang X., Power W. L. COMCOT: A Tsunami Generation Propagation and Run-Up Model. GNS Science: Lower Hutt City, New Zealand, 2011.
3. Shuto N., Goto C., Imamura F. Numerical simulation as a means of warning for near field tsunamis. Coastal Engineering in Japan, 33, 173–193, 1990.
4. Hayashi K., Vazhenin A., Marchuk A. Distributed nested streamed models of tsunami waves. International Journal of Computational Science and Engineering, 23(2), 124–135, 2020.
5. Stoker J. J. Water Waves. The Mathematical Theory with Applications. Interscience Publishers: New York, NY, USA, 1957.
6. Kowalik Z., Murty T. S. Numerical Modeling of Ocean Dynamics. World Scientific: Singapore, 1993.
7. MacCormack R. W., Paullay A. J. Computational Efficiency Achieved by Time Splitting of Finite-Difference Operators. AIAA paper, 72-154, 1972.
8. Lavrentiev M., Lysakov K., Marchuk A., Oblaukhov K. Fundamentals of Fast Tsunami Wave Parameter Determination Technology for Hazard Mitigation. Sensors, 22(19), 7630, 2022.
9. Lavrentiev M., Romanenko A., Titov V., Vazhenin A. High-Performance Tsunami Wave Propagation Modeling. B Proc. of the International Conference on Parallel Computing Technologies, Springer, Lecture Notes in Computer Science, 5698, 423–434, 2009.
10. Marchuk A. G. Benchmark solutions for tsunami wave fronts and rays. Part 2: Parabolic bottom topography. Science of Tsunami Hazards, 36(2), 70–85, 2017.
11. GEBCO Homepage: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/ (дата обращения 10.03.2025).

©А. С. Хорунженко, Ан. Г. Марчук, 2025

А. Т. Байшуаков^{1,2✉}, Е. Н. Кулик¹

Применение технологий искусственного интеллекта при выявлении болезней сельскохозяйственных посевов по материалам съемки

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский филиал ФГБУ «РосАгрохимслужба»,
п. Мичуринский, Новосибирская область, Российская Федерация
e-mail: arslan.bayschuakov@mail.ru

Аннотация. В условиях глобальных климатических/природных изменений и увеличения потребности в продовольствии, эффективное управление сельскохозяйственными ресурсами становится важнейшей задачей для агропромышленного сектора страны. Передовые технологии, в частности искусственный интеллект (ИИ), находят свое широкое применение в различных областях, включая сельское хозяйство. В статье рассматривается применение технологий ИИ для диагностики болезней посевов сельскохозяйственных культур с использованием данных, полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В рамках исследования был проведен библиометрический анализ, нацеленный на выявление основных направлений, тенденций и ключевых публикаций в области применения искусственного интеллекта в сельском хозяйстве. Анализ охватывает широкий спектр публикаций, включая научные статьи и материалы конференций, что позволяет сформировать объективное представление о развитии данной области. В статье также рассматриваются примеры применения ИИ и доступные инструменты, способствующие внедрению технологий точного земледелия на сельскохозяйственных предприятиях и фермерских хозяйствах. Приводится опыт успешного использования ИИ для прогнозирования распространения заболеваний, оптимизации внесения удобрений и средств защиты растений, а также для повышения общей эффективности управления сельскохозяйственными ресурсами.

Ключевые слова: искусственный интеллект, БПЛА, сельскохозяйственные культуры

A. T. Bayshuakov^{1,2✉}, E. N. Kulik¹

Application of artificial intelligence in identifying diseases of agricultural crops based on survey data

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation,

²Novosibirsk Branch FSBI «RosAgrokhimsluzhba»,
Michurinsky, Novosibirsk region, Russian Federation
e-mail: arslan.bayschuakov@mail.ru

Abstract. In the context of global climatic/natural changes and increasing food demand, effective management of agricultural resources is becoming an essential task for the country's agro-industrial sector. Advanced technologies, in particular artificial intelligence (AI), are widely used in various fields, including agriculture. The article discusses the use of artificial intelligence technologies for the diagnosis of crop diseases using data obtained from unmanned aerial vehicles (UAVs). As part of the study, a bibliometric analysis was conducted aimed at identifying the main directions, trends and key publications in the field of artificial intelligence in agriculture. The analysis covers a wide range

of publications, including scientific articles and conference proceedings, which allows to form an objective view of the progress of this field. The article also examines examples of AI applications and available tools that facilitate the introduction of precision farming technologies in agricultural enterprises and farms. Experience of successful use of AI for predicting the spread of diseases, optimizing the application of fertilizers and plant protection products, as well as for improving the overall efficiency of agricultural resource management are given.

Keywords: artificial intelligence, UAVs, agricultural crops

Введение

Современное сельское хозяйство активно преобразуется благодаря цифровым технологиям, и искусственный интеллект, анализирующий геопространственные данные, позволяет значительно повысить эффективность и точность сельскохозяйственных процессов. Интеграция технологий ИИ в агропромышленный комплекс (АПК) – это не только перспективное направление в будущем, но и реальность нынешнего времени, активно поддерживаемая в России на федеральном уровне. Искусственный интеллект становится мощным инструментом, способным оптимизировать процессы, предлагать методы для снижения риска низкой урожайности сельскохозяйственных посевов, повышать эффективность затрат и обеспечивать устойчивое развитие сельскохозяйственной отрасли.

Современные технологии, включая компьютерное зрение, аэрофотосъемку и дистанционное управление техникой, всё чаще применяются в сельском хозяйстве – независимо от масштабов предприятия.

БПЛА, оснащенные мультиспектральными и гиперспектральными камерами, датчиками, используются в сельскохозяйственных предприятиях, позволяя собирать большие объемы данных о состоянии сельскохозяйственных угодий. Здесь находят свое применение алгоритмы ИИ, способные в автоматическом режиме обрабатывать, интерпретировать данные и принимать решения, которые по скорости и точности превосходят традиционные методы сельскохозяйственного мониторинга. Это позволяет оптимизировать использование таких ресурсов, как вода, удобрения и пестициды.

Целью данной работы является исследование возможностей применения ИИ для управления и автоматизации работы БПЛА и их бортового оборудования в решении сельскохозяйственных задач, в числе которых мониторинг состояния растительности для выявления болезней и вредителей посевов сельскохозяйственных культур.

Методология и методы

В последнее время ИИ активно применяется в различных сферах жизнедеятельности общества [18]. Однако, понятие ИИ представляет собой еще не до конца изученную систему, и имеет разные определения, выдвинутые учеными разных специальностей. Согласно исследованиям авторов [2, 3, 25], проведенным на основе анализа более 70 определений ИИ, данный термин интерпретируется как системы, созданные людьми, способные к решению сложных задач и обработке больших данных.

По мнению авторов [16, 17] ИИ определяется как математическая модель и программное обеспечение, которые по структуре и функционированию подобны биологическим нейронным сетям живых организмов. В научной литературе ИИ [12] определяется как совокупность устройств, способных осуществлять когнитивные процессы, подобные человеческим.

Вопросы внедрения и использования технологий ИИ в сельском хозяйстве рассматривали российские ученые: А. А. Гришин, Л. П. Кормановский, Ю. Ф. Лачуга, Н. М. Морозов, П. А. Суровцев, Р. Р. Хисамов и другие. В процессе данного исследования используется библиометрический метод, который заключается в сборе и систематизации информации о научных работах разных авторов, областью изучения которых является применение ИИ технологий в сельском хозяйстве.

На начальном этапе изучены основные сельскохозяйственные задачи, решаемые с помощью материалов съемок с БПЛА и ИИ [1, 10, 23].

- мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур;
- обнаружение болезней растений;
- идентификация сорной растительности;
- классификация, определение и подсчет сельскохозяйственных плодов;
- дифференцированное внесение минеральных удобрений;
- точечное распыление пестицидов без ущерба для посевов сельскохозяйственных культур;
- прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур.

В исследованиях авторов [7, 8, 11] современные системы ИИ находят широкое применение в агропромышленном комплексе, обеспечивая поддержку принятия решений по основным аспектам сельского хозяйства. К числу таких решений ИИ относятся: оптимизация водопользования, планирование севооборотов, определение оптимальных сроков посева культур и уборки урожая, мониторинг и управление системами питания растений. Современные технологии с поддержкой ИИ, основанные на алгоритмах машинного обучения, в сочетании с изображениями, полученными со спутников и БПЛА, позволяют прогнозировать метеорологические условия и анализировать устойчивость урожая. Такие технологии способны диагностировать болезни растений, определить патологию, оценить состояние посевов на разных стадиях фенологического развития с учетом агроклиматических параметров [4].

ИИ позволяет обеспечить реализацию методов визуального анализа изображений для идентификации болезней растений и вредителей на них. Обработка и интерпретация данных осуществляется посредством систем компьютерного зрения, основанных на архитектуре искусственных нейронных сетей. Данная технология способна осуществлять раннюю диагностику заболеваний растений и их патогенов, что способствует повышению эффективности системы защиты растений.

В работе [20, 28] авторами рассмотрена практика применения ИИ для целей борьбы с заболеваниями посевов сельскохозяйственных культур. Авторы акцентируют внимание на использование нейронных сетей, которые стали стандартом в классификации и идентификации болезней растений. В основе подхода лежит анализ изображений и текстовых описаний [28].

В качестве примера успешной интеграции технологий в агропромышленный сектор можно привести компанию «Гарден Ритейл Сервис» [20], внедрившую приложение NoGa, которое взаимодействует с платформой, способной предоставлять пользователям возможности выявления заболеваний растений. В рамках сотрудничества с НЦМУ «Агротехнологии будущего», базирующимся на площадке Московской сельскохозяйственной академии имени К. А. Тимирязева [13], проводятся исследования с применением нейросетевых моделей. Цель этих исследований заключается в изучении влияния параметров освещения на процессы роста и развития растений. Разработка авторов [20, 28] направленная на решение задач диагностирования и предотвращения болезней посевов сельскохозяйственных культур, способствовала созданию платформы [15]. Созданная на данной платформе нейросетевая модель способна распознавать с точностью 95% более 50 различных болезней и вредителей посевов. У авторов платформы [15] имеется перспектива построить модели для определения дефицита основных элементов, таких как: N, P, Ca, Fe и др.

Зарубежными компаниями разработаны аналогичные приложения, работающие на основе ИИ. Например, разработанное в Германии приложение Plantix – позволяет выявлять дефицит питательных веществ в почве, включая вредителей и болезни растений [24]. Компания Tracse Genomics также применяет алгоритмы машинного обучения, что дает возможность фермерским хозяйствам анализировать плодородие почвы.

В сфере анализа изображений, получаемых с БПЛА и спутников, нейронные сети открывают перспективные возможности для дифференциации сорных растений от сельскохозяйственных культур. Авторами [27] описываются разработанные прогностические модели на основе нейронных сетей. Модель получает большой объем данных, охватывающий широкий спектр агрономических и метеорологических параметров: генетический тип почвы, гранулометрический (механический) состав, тип сельскохозяйственной культуры, фенологическая фаза роста и развития растений, влажность, температура, осадки, облачность.

Благодаря использованию БПЛА открывается возможность выполнять оперативный мониторинг и анализ состояния посевов сельскохозяйственных культур. В растениеводстве это позволяет осуществлять прогноз оптимального времени для посадки, рассчитывать циклы фенологического развития растений, включая их фазы от кущения до созревания. Внедрение технологий ИИ в процессы мониторинга значительно расширяет возможности анализа. ИИ способен обнаруживать дефицит макро- и микроэлементов в почве, а также недостаток питательных веществ в растениях, что в последующем может сигнализировать о критических состояниях посевов.

Автоматизированные дистанционные дроны осуществляют локальную доставку ресурсов, необходимых для растений, безопасно транспортируют пестициды для борьбы с вредителями, а также проводят фотосъемку местности. Это позволяет собирать и накапливать важную информацию для анализа и прогнозирования будущих урожаев, что является полезным для предприятий сельского хозяйства.

Сельскохозяйственные роботы помогают автоматизировать определенные процессы в агропромышленной сфере. Например, система Prospera [26], реализованная израильскими исследователями, эффективно используется для мониторинга посевов. Эта система уведомляет аграриев о появлении симптомов заболеваний у растений. Алгоритм способен выявлять на изображениях растений признаки плесени, бактерий или следы повреждений насекомыми, а также выполнять анализ различных данных о питании растений, прогнозах погоды, pH-кислотности и т.д., что в совокупности дает возможность фермерам оценивать потенциальные риски гибели посевов и предотвращать их. На рисунке 1 представлено фото и изображение, полученное ботами Prospera, где зеленым цветом показаны томаты, зараженные минералами, красным показан дефицит Mg, синим – дефицит K.

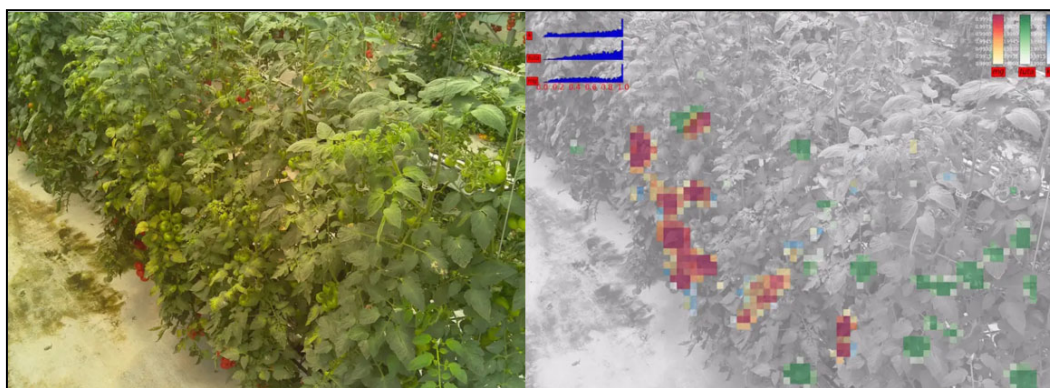


Рис. 1. Фото (слева) и изображение, полученное ботами Prospera (справа) [26]

Результаты

Исследования показали [9, 14, 19], что в сельском хозяйстве России к настоящему времени накоплен большой опыт использования технологий ИИ. Результаты исследования подтверждают, что технологии ИИ, в частности в сочетании с БПЛА, имеют значительный потенциал для улучшения диагностики и лечения заболеваний сельскохозяйственных культур, что, в свою очередь, способствует повышению устойчивости и продуктивности агропромышленного сектора.

Обсуждение

В 2022 году в Российской Федерации вступил в силу новый национальный стандарт ГОСТ Р 59920-2021 «Системы искусственного интеллекта в сельском хозяйстве. Требования к обеспечению характеристик эксплуатационной безопасности систем автоматизированного управления движением сельскохозяйствен-

ной техники» [6]. Этот ГОСТ стал первым в России нормативно-техническим документом, который регулирует использование технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве. Использование БПЛА для съемки сельскохозяйственных полей позволит значительно ускорить процесс сбора данных о состоянии посевов. Анализ изображений, полученных путем аэрофотосъемки, с помощью алгоритмов машинного обучения позволит выявлять симптомы заболеваний на ранних стадиях, что способствует более эффективному вмешательству и лечению растений.

Заключение

В ходе библиометрического анализа были исследованы прикладные и теоретические примеры применения ИИ в сельскохозяйственной отрасли. Следует подчеркнуть, что рассмотренные примеры ИИ в области сельского хозяйства отечественными и зарубежными компаниями, особенно в контексте выявления болезней посевов сельскохозяйственных культур, открывают новые горизонты для повышения эффективности и устойчивости аграрного производства.

Использование алгоритмов ИИ и обработки большого объема данных, включая изображения, полученные с БПЛА, обеспечивает возможность не только своевременно выявлять и диагностировать заболевания, но и оптимизировать процесс принятия решений на основе анализа полученных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абалуев, Р. Н. Перспективы использования аддитивных технологий в агропромышленном комплексе / Р. Н. Абалуев, С. О. Чиркин // Наука и Образование. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 311.
2. Анохин, К. В. Искусственный интеллект для науки и наука для искусственного интеллекта / К. С. Новоселов, С. К. Смирнов [и др.] // Вопросы философии. – 2022. – № 3. – С. 93–105.
3. Бадмаева, М. Х. К вопросу об особенностях и проблемах применения систем искусственного интеллекта в сельском хозяйстве / М. Х. Бадмаева // Вестник Бурятского государственного университета. – 2022. – №3. – С. 75–83.
4. Бычков, А. Д. Цифровизация – основной вектор развития сельского хозяйства / А. Д. Бычков, Н. В. Пчелинцева, Т. А. Полякова, [и др.] // Материалы Международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК», Мичуринск – 2021. – С. 53–55.
5. Вавилов, Н. А. Компьютер как новая реальность математики. I Personal Account / Н. А. Вавилов // Компьютерные инструменты в образовании. – 2020. – № 2. – С. 5–26.
6. ГОСТ Р 59920-2021 «Системы искусственного интеллекта в сельском хозяйстве. Требования к обеспечению характеристик эксплуатационной безопасности систем автоматизированного управления движением сельскохозяйственной техники».
7. Гущина, А. А. Применение искусственного интеллекта в обеспечении безопасности данных / А. А. Гущина, Н. В. Пчелинцева, В. А. Шацкий // Материалы Международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК», Мичуринск. – 2021. – С. 79–81.
8. Гущина, А. А. Устройства и технологии виртуальной реальности в нашей жизни / А. А. Гущина // Наука и Образование. – 2020. – Т. 3. – № 4. – С. 85.
9. Деревянных, Е. А. О применении искусственного интеллекта в сельском хозяйстве / Е. А. Деревянных, Т. В. Митрофанова, С. С. Сорокин [и др.] // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. – 2023. – № 4(27). – С. 182–187.
10. Копцев, П. Ю. Влияние информационных технологий на рост синергетического эффекта в АПК / П. Ю. Копцев, Н. В. Картечина, Ю. А. Скрипко // Материалы Международной

научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК», Мичуринск. – 2018. – С. 187–190.

11. Лазарева, А. А. Анализ состояния цифровизации сельскохозяйственных предприятий Рязанской области / А. А. Лазарева, Н. В. Пчелинцева // Наука и Образование. – 2020. – Т. 3. – № 2. – С. 47.

12. Масалов, Е. И. Искусственный интеллект – инновация, меняющая экономику стран и регионов / Е. И. Масалов // Управленческий учет. – 2023. – № 10. – С. 236–241.

13. ОИЯИ развивает платформу для распознавания болезней растений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://new.ras.ru/activities/news/oiyai-razvivaet-platformu-dlya-raspoznaniya-bolezney-rasteniy/> (дата обращения 15.03.2025).

14. Осовин, М. Н. Анализ современных тенденций внедрения технологий искусственного интеллекта в сельское хозяйство / М. Н. Осовин // Островские чтения. – 2024. – № 1. – С. 136–144.

15. Платформа распознавания болезней [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pdd.jinr.ru/> (дата обращения 15.03.2025).

16. Побединский, А. А. Опыт и перспективы применения искусственных нейронных сетей в сельском хозяйстве / А. А. Побединский // Агропродовольственная политика России. – 2022. – №4–5. – С 46–50.

17. Рустамов, Б. М. Искусственный интеллект и математическое моделирование / Б. М. Рустамов // Символ науки. – 2023. – №5–2. – С. 141–142.

18. Скворцов, Е. А. Применение технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве / Е. А. Скворцов, В. И. Набоков, К. В. Некрасов [и др.] // Аграрный вестник Урала. – 2019. – № 8 (187). – С. 91–98.

19. Сухоруков, С. В. Технологии искусственного интеллекта для сельского хозяйства в регионе / С. В. Сухоруков, Р. Б. Яковлев // Вестник Академии знаний. – 2024. – №3 (62). – С. 439–444.

20. Ужинский, А. Искусственный интеллект против болезней растений / А. Ужинский // Открытые системы СУБД. – 2022. – №3. – С. 29–31.

21. Федоренко, В. Ф. Мировые тенденции интеллектуализации сельского хозяйства / В. Ф. Федоренко, В. И. Черноиванов, В. Я. Гольяпин [и др.]. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. 232 с.

22. Чиркин, С. О. Применение искусственного интеллекта в сельском хозяйстве / С. О. Чиркин, Н. В. Картечина, В. А. Рубанов // Наука и образование. – 2022. – Т.5. – № 2. – Порядковый номер 242.

23. Чуйкин, К. А. Влияние дронов и искусственного интеллекта на сельское хозяйство / К. А. Чуйкин // Актуальность проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – С. 389–391.

24. 1 Free App for Crop Diagnosis and Treatments Farmers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://plantix.net/en/> (дата обращения 19.03.2025).

25. Legg, S. A Collection of Definitions of Intelligence / S. Legg, M. Hutter // Frontiers in Artificial Intelligence and Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/0706.3639> (дата обращения 12.03.2025).

26. Prospera Robot Can See Dying Plants Before Farmers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.businessinsider.com/prospera-robot-can-see-dying-plants-before-farmers-2016-7> (дата обращения 14.03.2025).

27. Robinson, C. A Neural Network System for the Protection of Citrus Crops from Frost Damage / C. Robinson, N. Mort. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.sci-hub.ru/10.1016/S0168-1699\(96\)00037-3?ysclid=mar4z-vibxj304500140](https://www.sci-hub.ru/10.1016/S0168-1699(96)00037-3?ysclid=mar4z-vibxj304500140) (дата обращения: 20.03.2025).

28. Uzhinskiy, A. Oneshot Learning With Triplet Loss for Vegetation Classification Tasks / A. Uzhinskiy, G. Ososkov, P. Goncharov, A. Nechaevskiy // Computer Optics. – 2021. – №45 (4). – С. 608–614.

© А. Т. Байшуаков, Е. Н. Кулик, 2025

А. Л. Верхотуров^{1✉}, А. С. Степанов²

Возможности спутниковой радиолокации для мониторинга пахотных земель

¹Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
(ВЦ ДВО РАН), г. Хабаровск, Российская Федерация

²Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства
(ДВ НИИСХ), Хабаровский край, с. Восточное, Российская Федерация
e-mail: andrey@ccfebras.ru

Аннотация. В работе представлены возможности спутникового радиолокационного мониторинга сельскохозяйственных культур Хабаровского края по данным миссий Sentinel-1A/B за период наблюдений с 2019 по 2021 гг., ALOS-2 и SMAP за 2023 г. Для пахотных полей с культурами (соя, овес), а также неиспользуемых земель были сформированы временные серии радиолокационных вегетационных индексов, рассчитаны показатели интерферометрической когерентности и влажности почв. Результаты исследования свидетельствуют о наличии характерной сезонной динамики у индексов DpRVI, RVI и VH/VV для каждой изучаемой культуры. DpRVI обладает наибольшей устойчивостью по сравнению с остальными рассматриваемыми индексами. Установлено, что статистическая значимость показателей коэффициентов вариации сезонного хода DpRVI ниже, чем у индексов RVI и VH/VV. Выявлено, что отношение значений когерентности VH-поляризации к VV коррелирует с NDVI и может быть использовано для мониторинга роста культур ($R^2=0,87$ для сои, $R^2=0,89$ для овса). Проведена сравнительная характеристика определения влажности почв и данных полевых исследований (модель Dubois и модель Surface Moisture Index).

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, данные радиолокационной спутниковой съемки, мониторинг сельскохозяйственных земель, вегетационные индексы, интерферометрическая когерентность, влажность почв

A. L. Verkhoturov^{1✉}, A. S. Stepanov²

SAR data capability for crop monitoring

¹Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
(CC FEB RAS), Khabarovsk, Russian Federation

²Far Eastern Research Institute of Agriculture (FEARI), Vostochnoye, Russian Federation
e-mail: andrey@ccfebras.ru

Abstract. The paper presents the capabilities of satellite SAR monitoring of crops in Khabarovsk Krai using data from Sentinel-1A/B missions for the observation period from 2019 to 2021, ALOS-2 and SMAP for 2023. Time series of SAR vegetation indices were formed for arable fields with crops (soybean, oats), as well fallow lands, interferometric coherence and soil moisture indices were calculated. The results of the study indicate the presence of characteristic seasonal dynamics in DpRVI, RVI and VH/VV indices for each crop studied. DpRVI has the highest stability compared to the other indices considered. It was found that the statistical significance of the indices of the coefficients of variation of seasonal course DpRVI is lower than that of the indices RVI and VH/VV. The ratio of VH-polarisation to VV-polarisation coherence values was found to correlate with NDVI and can be used to monitor crop growth ($R^2=0.87$ for soybean, $R^2=0.89$ for oats). A comparative

characterisation of soil moisture measuring and in situ data (Dubois model and Surface Moisture Index model) was carried out.

Keywords: remote sensing, synthetic-aperture radar data, agricultural land monitoring, vegetation indices, coherence, soil moisture

Введение

Наряду с данными в оптическом диапазоне длин волн, на текущий момент одним из эффективных инструментов мониторинга сельскохозяйственных (с/х) культур являются данные с радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Они позволяют получать достаточно полную информацию о состоянии пахотных земель, проводить классификацию культур, измерять влажность почв и поверхности растительного покрова [1–3]. Существующие алгоритмы радиолокационных вегетационных индексов [4–6] учитывают особенности съемки в режиме двойной поляризации, что делает возможным их применение к данным миссии Sentinel-1A/B. При этом, в расчетах используется коэффициент обратного рассеяния радарного сигнала различных поляризаций. В отличие от индексов, значения интерферометрической когерентности зависят от фазы сигнала, и она чувствительна к изменениям между съемками, вызванным растительностью и ее активным ростом. Эти данные потенциально пригодны для использования в качестве замены NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [7]. К тому же, в настоящее время разработаны методы и алгоритмы определения влажности почв по материалам радиолокационной съемки [2, 3, 8, 9]. Вода представляет собой уникальный объект для дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне, который используется системами с РСА и скаттерометрами. Будучи единственной природной средой с высокой диэлектрической проницаемостью (ϵ), она оказывает значительное влияние на электромагнитные характеристики почвы, снежного покрова и растительности: увеличение содержания жидкой воды в этих средах приводит к возрастанию ϵ , что, в свою очередь, существенно изменяет параметры рассеяния и поглощения микроволнового излучения. Удельная эффективная площадь рассеяния (σ^0), регистрируемая РСА, определяется комплексом факторов, включая диэлектрические свойства приповерхностного слоя, шероховатость поверхности и биомассы. Таким образом, данные РСА представляют собой особый интерес в исследованиях и в задачах мониторинга с/х угодий.

Целью данной работы является оценка возможностей спутниковой радиолокации для мониторинга пахотных земель. Были поставлены следующие задачи: оценить вариативность временных рядов радиолокационных вегетационных индексов для сои, овса и залежи; провести сравнительную оценку интерферометрической когерентности различных комбинаций поляризационных каналов с NDVI; сравнить характеристики влажности почв по данным SMAP, ALOS-2 и полевым исследованиям.

Область исследования и используемые данные

Исследование проводилось на с/х полях правобережья реки Амур за период 2019–2021 гг. В качестве входных данных были использованы спутниковые

снимки С-диапазона (длина волны 5,6 см) Sentinel-1B, спутниковые снимки L-диапазона (длина волны 24 см) ALOS-2, данные спутниковой миссии SMAP (Soil Moisture Active Passive), данные измерений влажности почв in situ (таблица 1).

Таблица 1

Параметры радиолокационной съемки исследуемой территории

Спутниково- вая миссия	Период наблюдения	Режим съемки	Пространственное разре- шение	Поляризация
Sentinel-1B	С мая по ок- тябрь 2019– 2021 гг.	IW	10 м × 10 м	VV, VH
ALOS-2	С мая по ок- тябрь 2023 г.	ScanSAR	25 м × 25 м	HH, HV
SMAP	С мая по ок- тябрь 2023 г.	-	9 км × 9 км	H,V

Результаты исследования

Для каждого типа растительности в период 2019–2021 гг. были определены основные характеристики кривых сезонного хода вегетационных индексов (DpRVI, RVI и VH/VV): значения максимума, день наступления максимума. Было установлено, что временные ряды индекса DpRVI имеют наименьшую вариативность в сравнении с VH/VV и RVI. В качестве примера на рисунке 1 представлены значения временного ряда DpRVI для всех полей сои Хабаровского края в 2021 году. Как видно, большинство кривых имеют характерную форму, различия в форме вызваны неоднородностью роста сои.

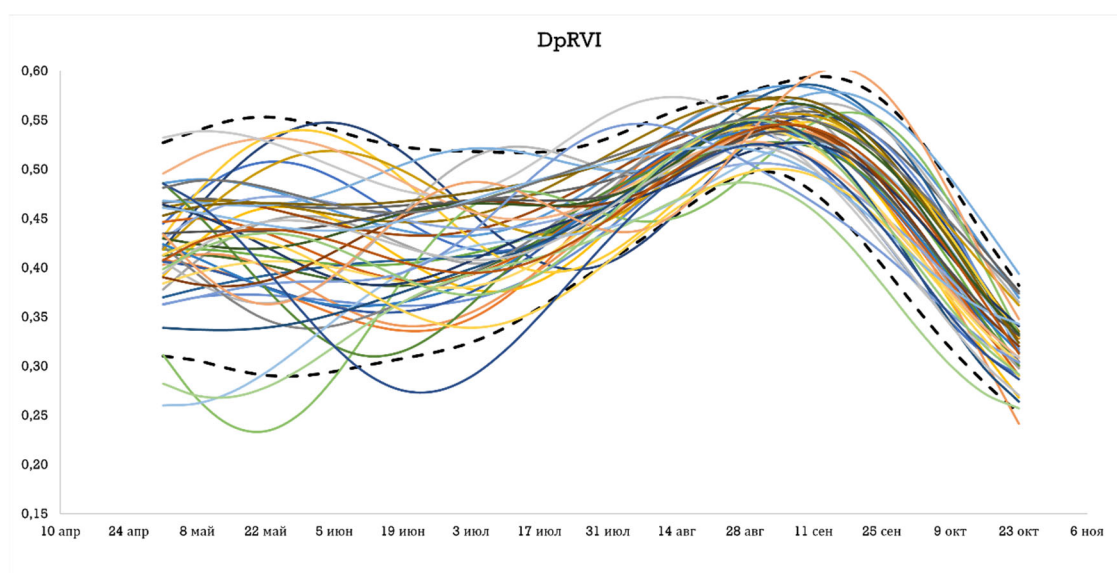


Рис. 1. Временная серия DpRVI сельскохозяйственных полей сои Хабаровского края.

На рисунке 2 приведены временные ряды когерентности для полей сои в 2021. Значения когерентности чувствительны к изменениям отражательных свойств поверхности между съемками, что позволяет использовать её для определения сроков посева и даты уборки культур. Выявлено, что отношение значений когерентности VH-поляризации к VV коррелирует с NDVI и может быть использовано для мониторинга роста культур ($R^2=0,87$ для сои, $R^2=0,89$ для овса).

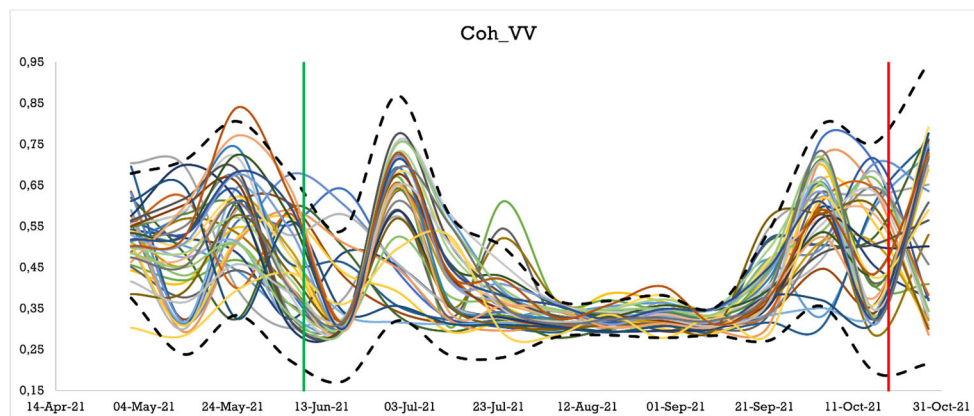


Рис. 2. Временная серия когерентности сельскохозяйственных полей сои Хабаровского края.

За вегетационный период 2023 года были проведены исследования влажности почв с применением двух полуэмпирических моделей: модель Dubois [2] и SurfMI [3] по данным ALOS-2. Для оценки возможности использования моделей анализировались данные метеостанции (осадки, мм) и результаты измерений показателей влажности в образцах почвы пахотного горизонта. Анализ показал, что, во-первых, данные SMAP согласовывались с результатами наземных наблюдений, во-вторых, модель Dubois продемонстрировала более высокую точность, а модель SurfMI завышала результаты. Было отмечено, что чувствительность к влажности почв данных L-диапазона для культур плотного покрова выше, чем для С-диапазона длин волн. При этом чувствительность радиолокационных данных L-диапазона не зависела от классов растительности.

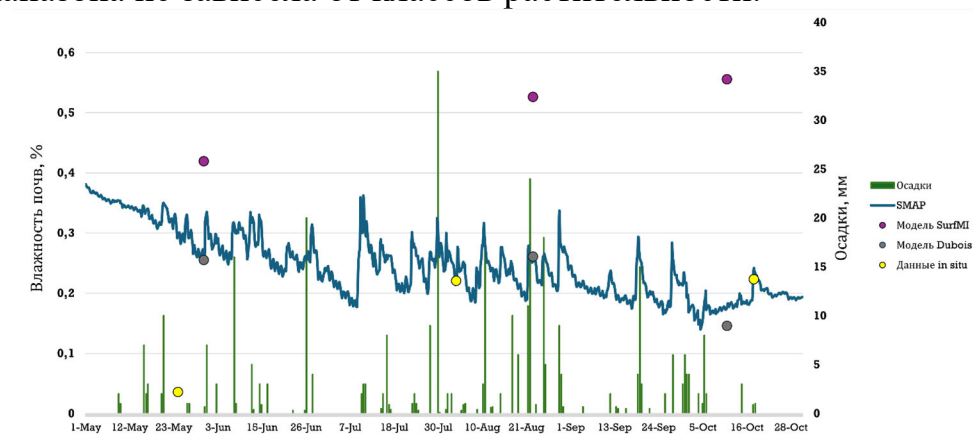


Рис. 3. Показатели влажности почв.

Модель Dubois – серый цвет, модель SurfMI – фиолетовый цвет, данные SMAP – синий цвет, данные полевых исследований – желтый цвет, осадки – зеленый цвет.

Выводы

Установлена, что данные спутниковой радиолокационной съемки могут быть использованы в комплексном мониторинге земель сельскохозяйственного назначения. Во-первых, временные ряды DpRVI имеют наименьшую вариабельность среди радарных индексов и могут быть использованы в качестве эталонных в моделях машинного обучения. Во-вторых, когерентность имеет высокую корреляцию с NDVI, хорошую чувствительность к изменению отражательных свойств поверхности, и, таким образом, может служить индикатором сева и уборки. В-третьих, влажность пахотных земель может быть оценена с помощью радиолокационных моделей (модели влагосодержания почв Dubois по данным ALOS-2). Вместе с тем, запуск российских радиолокационных спутников, а также вывод на орбиту нового Sentinel-1C предполагает сравнительную оценку качества модели Dubois и для прочих спутников в дальнейшем.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РНФ № 24-11-20030 и Правительства Хабаровского края № 106С/2024 от 31.07.2024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eisfelder C., Boemke B., Gessner U. et al. Cropland and Crop Type Classification with Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series Using Google Earth Engine for Agricultural Monitoring in Ethiopia // *Remote Sensing*. – 2024. – Vol. 16(5). – P. 866.
2. Dubois P.C., van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1995. – Vol. 33(4). – Pp. 915–926.
3. Urban M., Berger C., Mudau T.E. et al. Surface Moisture and Vegetation Cover Analysis for Drought Monitoring in the Southern Kruger National Park Using Sentinel-1, Sentinel-2, and Landsat-8 // *Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 10(9). – P. 1482.
4. Kim Y., van Zyl J.J. A Time-Series Approach to Estimate Soil Moisture Using Polarimetric Radar Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2009. – Vol. 47(8). – Pp. 2519–2527.
5. Kumar S.D., Rao S.S., Sharma J.R. Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton // *Indian Cartographer*. – 2013. – Vol. 23. – Pp. 91–96.
6. Mandal D., Kumar V., Ratha D., et al. Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data // *Remote Sensing of Environment*. – 2020. – Vol. 247. – Pp. 111954.
7. Villarroya-Carpio A., Lopez-Sanchez J.M. Multi-Annual Evaluation of Time Series of Sentinel-1 Interferometric Coherence as a Tool for Crop Monitoring // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23(4). – P. 1833.
8. Oh Y. Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2004. – Vol. 42(3). – Pp. 596–601.
9. Музалевский К.В. Широкополосный рефлектометрический метод измерения влажности и степени шероховатости поверхности почвы // *Журнал радиоэлектроники*. – 2022. – Т. 12.

© А. Л. Верхотуров, А. С. Степанов, 2025

Д. В. Долгополов^{1✉}, Т. И. Кузнецов¹, А. Л. Федотов¹

Применение данных дистанционного зондирования Земли для информационного обеспечения геотехнического мониторинга магистральных трубопроводов

¹Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта,
г. Москва, Российская Федерация
e-mail: DolgopolovDV@niitnn.transneft.ru

Аннотация. Рассматривается опыт использования данных дистанционного зондирования Земли для решения задач в рамках геотехнического мониторинга магистральных трубопроводов. Ключевыми задачами среди которых являются: мониторинг пространственного положения объектов линейной части магистрального трубопровода по данным воздушного лазерного сканирования; выявление экзогенных геологических процессов с использованием ортофотопланов и цифровой модели рельефа в коридоре трассы трубопровода; анализ динамики экзогенных геологических процессов с использованием цифровых моделей рельефа, построенных на разных циклах мониторинга. Отмечается, что важным является выявить закономерности между ненормативным состоянием трубопровода и протекающими природными, природно-техногенными и техногенными процессами в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов; исследовать факторы, которые оказывают влияние на состояние трубопровода и разработать методы их распознавания по материалам дистанционного зондирования.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг; цифровая аэросъемка; воздушно-лазерное сканирование; цифровая модель рельефа; магистральный трубопровод; экзогенные геологические процессы

D. V. Dolgopolov^{1✉}, T. I. Kuznetsov¹, A. L. Fedotov¹

Application of remote sensing data for information support of geotechnical monitoring of main pipelines

¹ Pipeline Transport Institute, LLC (Transnet R&D, LLC), Moscow, Russian Federation
e-mail: DolgopolovDV@niitnn.transneft.ru

Abstract. The experience of using Earth remote sensing data to solve problems in the framework of geotechnical monitoring of main pipelines is considered. The key tasks among which are: monitoring the spatial position of objects in the linear part of the main pipeline based on aerial laser scanning data; identification of exogenous geological processes using orthophotoplanes and a digital relief model in the pipeline route corridor; analysis of the dynamics of exogenous geological processes using digital relief models based on different monitoring cycles. It is noted that it is important to identify patterns between the abnormal condition of the pipeline and ongoing natural, man-made, and man-made processes during the operation of main pipelines; to investigate the factors that affect the condition of the pipeline and to develop methods for recognizing them based on remote sensing data.

Keywords: geotechnical monitoring; digital aerial photography; airborne laser scanning; digital relief model; main pipeline; exogenous geological processes

Введение

Геотехнический мониторинг магистральных трубопроводов (МТ) проводится на участках трубопровода, проходящих в сложных природно-климатических и геологических условиях (общая протяженность более 7 000 км). Для решения задач геотехнического мониторинга ранее проводились аэровизуальные и инженерные обследования трассы трубопровода. В процессе аэровизуальных обследований выявлялись опасные экзогенные геологические процессы, в ходе инженерных работ геологи в поле уточняли их влияние на трубопровод. Для измерения планово-высотного положения (ПВП) объектов трубопроводной системы изначально использовались классические методы инструментальных геодезических измерений. В дальнейшем классические методы измерения сменили методы спутниковых определений, а также методы аэросъемки, в том числе с использованием ВЛС [1–8]. Для проведения воздушного лазерного сканирования (ВЛС) на трубопроводах подземной прокладки были установлены устройства определения высоты [9].

Объектами мониторинга являются протяженные объекты МТ (линейная часть (ЛЧ) и нефтеперекачивающие станции), а также опасные природные процессы и их проявления в коридоре трассы, способные оказать влияние на трубопровод). Задачей наших исследований является информационное обеспечение задач геотехнического мониторинга данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации МТ (рисунок 1).



Рис. 1. Обобщенная схема аэрокосмического мониторинга при геотехническом мониторинге МТ (по [10] с дополнениями)

Данные, полученные в ходе мониторинга, должны обеспечивать расчет текущего и прогнозного состояния объектов МТ с учетом изменений природно-

климатических и эксплуатационных условий. Для этого контроль пространственного положения трубопровода осуществляют с использованием технологии воздушного лазерного сканирования, дополняя его геодезическим методом спутниковых определений. Периодичность определения планово-высотного положения объектов МТ на участках с многолетнемерзлыми грунтами 2 раза в год. Погрешность определения ПВП объектов трубопровода методом ВЛС составляет не более 6 см.

Выявление и контроль развития экзогенных геологических процессов (ЭГП) опасных для трубопровода, осуществляют один раз в год в полосе 150 м (не менее 75 м вправо и влево от оси трубопровода) средствами ВЛС и цифровой аэро съемки. В процессе исследований для анализа по материалам воздушного лазерного сканирования формируется цифровая модель рельефа с погрешностью определения высоты 6 см., а по материалам цифровой аэро съемки строится цифровой ортофотоплан с пространственным разрешением 4 см.

В настоящее время в рамках геотехнического мониторинга осуществляют аэрокосмическую съемку магистрального трубопровода со следующими основными целями:

- картографирование объектов МТ;
- контроль ПВП объектов магистральных трубопроводов;
- выявление ЭГП;
- мониторинг развития ЭГП;
- контроль отклонения от вертикали опор ЛЭП;
- подготовка компенсирующих мероприятий;
- разработка программ мониторинга объектов магистрального трубопровода

Результаты

Мониторинг осуществляется для магистральных трубопроводов, проложенных в сложных природно-климатических условиях, общей протяженностью 7000 км преимущественно средствами цифровой аэро съемки и воздушного лазерного сканирования. В результате мониторинга выявлено более 5500 опасных геологических процессов в коридоре трассы трубопровода.

В процессе работ, были разработаны методики обработки данных ДЗЗ для решения производственных задач геотехнического мониторинга, в том числе:

- дешифрирование объектов линейной части МТ по данным аэрокосмической съемки (использование ортофотопланов) [11, 12];
- определение планово-высотного положения объектов линейной части магистрального трубопровода по данным ВЛС с использованием устройств определения высоты;
- выявление экзогенных геологических процессов по данным цифровой аэро съемки и цифровой модели рельефа, построенной по данным ВЛС [13–15];
- анализ динамики ЭГП между циклами мониторинга с использованием ЦМР, построенных на каждом цикле, и анализом разницы между ними;

- классификация выявленных ЭГП по типу протекающих процессов;
- количественная оценка ЭГП, по данным ВЛС, оценка степени опасности;
- контроль отклонения от вертикали опор ЛЭП по данным ВЛС.

В целях информационного обеспечения геотехнического мониторинга, автоматизации процесса обработки данных ДЗЗ, реализации математических моделей расчета были разработаны следующие программы для ЭВМ и базы данных, в том числе:

- ГИС Мониторинг [16];
- Архив электронных копий проектной и исполнительной документации объектов МН «Куюмба – Тайшет» [17];
- Модель данных для расчета ореолов оттаивания с использованием программно-расчетного модуля [18];
- Модель данных для расчетов планово-высотного положения с использованием программно-расчетного модуля [19];
- Программный модуль автоматизированного анализа планово-высотного положения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС [20];
- Программный модуль автоматизированного анализа параметров сложных геологических условий расположения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС [21].

Для осуществления эффективного мониторинга протяженных трасс МТ требуется помимо технологий дистанционного зондирования использовать современные геоинформационные технологии, а также, при необходимости, разрабатывать средства автоматизированной обработки пространственных данных. Наш практический опыт показывает, что при разработке систем оценки фактического состояния МТ по данным мониторинга, систем поддержки принятия решений важной задачей является разработка требований к предельным значениям параметров мониторинга объектов МТ. Помимо этого, необходимо изучить закономерности развития и протекания природных, природно-техногенных и техногенных процессов в процессе эксплуатации МТ, исследовать факторы, которые оказывают влияние на состояние МТ и разработать методы их распознавания по материалам ДЗЗ. При наличии таких отраслевых знаний, современные технологии ДЗЗ совместно с информационными технологиями обеспечивают возможность своевременно выявить ненормативное и аварийное состояния трубопровода и причины их возникновения.

Оценка методов съемки с точки зрения требуемой точности, а также необходимости выявления и мониторинга факторов, влияющих на трубопровод, позволят оптимизировать систему мониторинга МТ. При этом могут быть использованы новые, экономически более эффективные технологии ДЗЗ, которые обеспечивают нам получение необходимых данных с нужной точностью. В качестве такой технологии может выступать, например, космическая радарная интерферометрия при условии создания отечественной космической группировки, которая обеспечить получение радарных изображений, а также апробации методов мониторинга объектов МТ.

Заключение

Технологии ДЗЗ доказали свою эффективность и могут быть эффективно использованы не только в рамках геотехнического мониторинга, но и для решения широкого круга производственных задач, на разных этапах жизненного цикла магистрального трубопровода, в том числе:

- на этапе предпроектного обследования для сбора данных о территории проектирования, создания ортофотоплана, получения цифровой модели рельефа (ЦМР);
- при инженерно-геодезических изысканиях для создания инженерно-топографических планов, формирования ЦМР;
- в процессе архитектурно-строительное проектирование при разработке проектной и рабочей документации, создании и уточнении BIM – моделей;
- в процессе эксплуатации при контроле зон с особыми условиями использования территории (ЗООИТ), оформлении прав на земельные участки, контроле использования арендованных земель, планировании работ в рамках программ капитального ремонта, обеспечения безопасности магистрального трубопровода;
- при создании цифровой модели местности, в том числе для разработки планов по ликвидации аварийных разливов нефти (ПЛАРН) на суше;
- в процессе строительства и реконструкции данные цифровой аэросъемки и лазерного сканирования могут быть использованы как инструменты строительного контроля при сравнении «план/факт», оценке объемов работ, создании исполнительной документации «как построено».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте / Д. В. Долгополов, М. Ю. Баборыкин, Е. В. Жидиляева, В. А. Мелкий // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2(52). – С. 25–34. – DOI 10.25714/MNT.2022.52.003. – EDN YCMEZK.
2. Долгополов, Д. В. Применение технологий дистанционного зондирования Земли для обеспечения геотехнического мониторинга и картографирования на трубопроводном транспорте / Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий, М. Ю. Баборыкин // Региональные геосистемы. – 2022. – Т. 46, № 3. – С. 339–355. – DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355. – EDN ABWPNH.
3. Макарычева, Е. М. Перспективы использования метода воздушного лазерного сканирования при проведении инженерных изысканий на территории криолитозоны / Е. М. Макарычева, Т. И. Кузнецов // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : материалы шестнадцатой общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций, Москва, 01–03 декабря 2021 года / ООО «Геомаркетинг»; ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»; Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве» - Общероссийское отраслевое объединение работодателей Союз изыскателей. – Москва: Геомаркетинг, 2021. – С. 390–396. – EDN FWKKSА.
4. Макарычева Е. М., Ибрагимов Э. Р., Кузнецов Т. И., Шуршин К. Ю. Применение воздушного лазерного сканирования для геотехнического мониторинга объектов магистрального трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов: ООО «Транснефть-Медиа» Т. 9. № 1. – Москва, 2019. – С. 21–31.
5. Lausch, Angela & Schaepman, Michael & Skidmore, Andrew & Catana, Eusebiu & Bannehr, Lutz & Bastian, Olaf & Borg, Erik & Bumberger, Jan & Dietrich, Peter & Cornelia, Glaesser

& Hacker, Jorg & Höfer, Rene & Jagdhuber, Thomas & Jany, Sven & Jung, András & Karnieli, Arnon & Klenke, Reinhard & Kirsten, Toralf & Ködel, Uta & Baatz, Roland. (2022). Remote Sensing of Geomorphodiversity Linked to Biodiversity–Part III: Traits, Processes and Remote Sensing Characteristics. *Remote Sensing*. 2279. 10.3390/rs14092279.

6. Amelunke, Michael & Anderson, Carlton & Waldron, Margaret & Raber, George & Carter, Gregory. (2024). Influence of Flight Altitude and Surface Characteristics on UAS-LiDAR Ground Height Estimate Accuracy in *Juncus roemerianus* Scheele-Dominated Marshes. *Remote Sensing*. 16. 384. 10.3390/rs16020384.

7. Geotechnical Monitoring Of Pipelines Located In Difficult Climatic Conditions / E. M. Makarycheva, V. I. Surikov, T. I. Kuznetsov, D. V. Dolgoplov // 13 Pipeline Technology Conference, Berlin, 12–14 марта 2018 года. – Berlin: ESTREL CONVENTION CENTER, 2018. – P. 14–20. – EDN CWDGRQ.

8. Resop, Jonathan & Lehmann, Laura & Hession, W. (2019). Drone Laser Scanning for Modeling Riverscape Topography and Vegetation: Comparison with Traditional Aerial Lidar. *Drones*. 3. 35. 10.3390/drones3020035.

9. Патент на полезную модель № 182554 U1 Российская Федерация, МПК F17D 5/00. Устройство определения планово-высотного положения магистрального нефтепровода: № 2018118608: заявл. 21.05.2018; опубл. 22.08.2018 / А. Г. Воронов, С. Н. Чужин, А. А. Захаров [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество "Транснефть" (ПАО "Транснефть"), Общество с ограниченной ответственностью "Транснефть - Восток" (ООО "Транснефть - Восток"), Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта" (ООО "НИИ Транснефть"). – EDN RQPZAP.

10. Карпик, А. П. Геодезическая пространственная информационная система для обеспечения устойчивого развития территорий: специальность 25.00.32 «Геодезия»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Карпик Александр Петрович. – Новосибирск, 2005. – 51 с. – EDN NJUDKJ.

11. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения / Д. В. Долгополов, Д. В. Никонов, А. В. Полуянова, В. А. Мелкий // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 65–81. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81. – EDN BQCQZY.

12. Дешифрирование инфраструктуры магистральных трубопроводов по аэрокосмическим изображениям / Д. В. Долгополов, Д. В. Никонов, В. А. Мелкий, В. В. Братков // Мониторинг. Наука и технологии. – 2020. – № 2(44). – С. 19–25. – DOI 10.25714/MNT.2020.44.003. – EDN MOYFVT.

13. Долгополов, Д. В. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования Земли / Д. В. Долгополов, М. Ю. Баборыкин, В. А. Мелкий // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 4, № 1. – С. 25–32. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32. – EDN CZDJRR.

14. Макарычева, Е. М. Методика районирования территории протяженных линейных объектов по условиям формирования термокарста / Е. М. Макарычева, В. П. Мерзляков, О. К. Миронов // Криосфера Земли. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 58–66. – DOI 10.15372/KZ20230106. – EDN OWALQR.

15. Баборыкин М.Ю., Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Выявление опасных геологических процессов при проведении инженерно-геологических изысканий на основе цифровых моделей рельефа // Инженерные изыскания. – 2015. – № 2. – С. 30–37.

16. 3D-ГИС для сопровождения работ по геотехническому мониторингу объектов магистральных трубопроводов / Е. М. Макарычева, Т. И. Кузнецов, С. А. Половков [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – Т. 10, № 4. – С. 342–351. – DOI 10.28999/2541-9595-2020-10-4-342-351. – EDN ONKIAZ.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662894 Российская Федерация. Архив электронных копий проектной и исполнительной документации объектов МН "Куюмба – Тайшет" : № 2017619837 : заявл. 03.10.2017: опубл. 20.11.2017 / В. И. Суриков, Д. В. Долгополов, Д. Ю. Федоренко [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество «Транснефть» (ПАО «Транснефть»), Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть»), Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть – Восток» (ООО «Транснефть – Восток»). – EDN IWXROS.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661876 Российская Федерация. Модель данных для расчета ореолов оттаивания с использованием программно-расчетного модуля: № 2017618891: заявл. 01.09.2017: опубл. 24.10.2017 / В. И. Суриков, Е. А. Покровская, Т. И. Кузнецов [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «Транснефть» (ПАО «Транснефть»), Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть»). – EDN TZOAQE.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662021 Российская Федерация. Модель данных для расчетов планово-высотного положения с использованием программно-расчетного модуля: № 2017618892: заявл. 01.09.2017: опубл. 26.10.2017 / В. И. Суриков, Э. Р. Ибрагимов, Т. И. Кузнецов [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «Транснефть» (ПАО «Транснефть»), Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» (ООО «НИИ Транснефть»). – EDN XWNKAW.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680590 Российская Федерация. Программный модуль автоматизированного анализа планово-высотного положения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС: № 2023680005: заявл. 29.09.2023: опубл. 03.10.2023 / Т. И. Кузнецов, А. И. Барышев, Е. А. Покровская [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество «Транснефть», Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть – Восток», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть – Дальний Восток», Акционерное общество «Транснефть - Сибирь». – EDN KBXQWB.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682372 Российская Федерация. Программный модуль автоматизированного анализа параметров сложных геологических условий расположения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС: № 2023680694: заявл. 06.10.2023: опубл. 25.10.2023 / Т. И. Кузнецов, А. И. Барышев, Е. А. Покровская [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество «Транснефть», Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть – Восток», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть – Дальний Восток», Акционерное общество «Транснефть - Сибирь». – EDN FORHAO.

© Д. В. Долгополов, Т. И. Кузнецов, А. Л. Федотов, 2025

Т. И. Кузнецов¹, Д. В. Долгополов^{1✉}, А. И. Барышев¹

Мониторинг трасс магистральных трубопроводов с использованием средств воздушного лазерного сканирования и дифференциальной подсистемы ГНСС

¹Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта,
г. Москва, Российская Федерация
e-mail: DolgopolovDV@niitnn.transneft.ru

Аннотация. Рассматривается опыт применения цифровой аэросъемки (ЦАФС) и воздушного лазерного сканирования (ВЛС) для задач мониторинга магистральных трубопроводов (МТ) с использованием дифференциальной подсистемы ГНСС. Данный подход актуален при организации геотехнического мониторинга магистральных трубопроводов, расположенных в условиях криолитозоны на значительных по протяженности, труднодоступных территориях. В статье приводится описание методики геотехнического мониторинга с использованием технологий цифровой аэросъемки и ВЛС. Методика обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предусматривает получение цифровой модели рельефа (ЦМР), а также ортофотоплана для выявления и мониторинга опасных геологических процессов в коридоре трассы трубопровода. Помимо этого для исследования коридора трассы создают серию производных карт с на коридор трассы 150-300 м. Приводится сравнение результатов двух циклов мониторинга трубопровода, полученных с использованием дифференциальной подсистемы ГНСС и без. Делается вывод о целесообразности развертывания дифференциальной подсистемы ГНСС на объектах мониторинга.

Ключевые слова: воздушно-лазерное сканирование; геотехнический мониторинг; дифференциальная подсистема ГНСС; магистральный трубопровод; экзогенные геологические процессы

T. I. Kuznetsov¹, D. V. Dolgopolov^{1✉}, A. I. Baryshev¹

Monitoring of main pipeline routes using airborne laser scanning and the GNSS differential subsystem

¹ Pipeline Transport Institute, LLC (Transnet R&D, LLC), Moscow, Russian Federation
e-mail: DolgopolovDV@niitnn.transneft.ru

Abstract. The experience of using digital aerial photography (DAFS) and airborne laser scanning (VLSI) for monitoring main pipelines (MT) using the differential GNSS subsystem is considered. This approach is relevant in the organization of geotechnical monitoring of main pipelines located in cryolithozone conditions in significant, inaccessible territories. The article describes the methods of geotechnical monitoring using digital aerial photography and radar technologies. The Earth remote sensing (DZ) data processing technique provides for obtaining a digital relief model (DEM), as well as a photo plan for identifying and monitoring hazardous geological processes in the pipeline route corridor. For this purpose, to explore the corridor of the route, a series of lead maps are created from the corridor of the route 150-300 m. The results of two pipeline monitoring cycles obtained using the differential GNSS subsystem and without are compared. The conclusion is made about the expediency of deploying the differential GNSS subsystem at monitoring facilities.

Keywords: airborne laser scanning (LIDAR); geotechnical monitoring; differential subsystem of GNSS; trunk pipeline; exogenous geological processes

Введение

Для обеспечения безопасной эксплуатации объектов магистральных трубопроводов организуется геотехнический мониторинг в рамках которого решаются задачи контроля состояния системы «трубопровод – окружающая среда», в том числе разработки компенсирующих мероприятий на участках выявленных отклонений системы от проектных значений. В процессе геотехнического мониторинга осуществляется сбор, обработка и анализ данных о фактическом состоянии магистральных трубопроводов и природной среды, а также моделирование протекающих процессов и прогноз их развития [1–6]. При организации мониторинга особое внимание уделяется контролю планово-высотного положения объекта, а также возникновению и развитию экзогенных геологических процессов (ЭГП), так как изменение планово-высотного положения трубопровода (чаще всего, связанного с ЭГП) могут вызвать рост напряжений и деформаций вплоть до предельных значений и, как следствие, потерю устойчивости и разрушение конструкции.

С развитием средств дистанционного зондирования мониторинг трасс магистральных трубопроводов все чаще осуществляют с использованием средств воздушного лазерного сканирования [7–12]. При этом как правило для протяженных линейных объектов трубопроводных систем существует проблема взаимной увязки данных разных циклов измерений, что требует решение задачи по геодезическому обеспечению (координатному и высотному), которая решается путем создания единого координатного пространства для объекта мониторинга на весь срок эксплуатации объекта для чего может быть развернута дифференциальная подсистема ГНСС.

Методы и материалы

С целью формирования единого координатного пространства на объектах геотехнического мониторинга ПАО «Транснефть» развернута дифференциальная подсистема ГНСС, представленная в виде местных автоматизированных геодезических сетей (далее – МАГС) для геодезического обеспечения геотехнического мониторинга [13]. МАГС обеспечивает возможности работы в следующих системах координат: МСК, WGS-84. МАГС представляет собой сеть постоянно действующих референцных станций, объединенных посредством каналов связи с центром хранения и обработки геодезических данных. Рекомендованное расстояние между референцными станциями не более 40 км (рисунок 1).

МАГС обеспечивает среднюю квадратическую погрешность определений:

- в режиме «Статика» и «Быстрая статика», не более: 5 мм + 0,5 мм/км в плане и 10 мм + 0,5 мм/км по высоте;

- в режиме непрерывной кинематики, в режиме «стой-иди» с последующей обработкой и режиме «RTK», не более: 10 мм + 1,0 мм/км в плане и 20 мм + 1,0 мм/км по высоте.

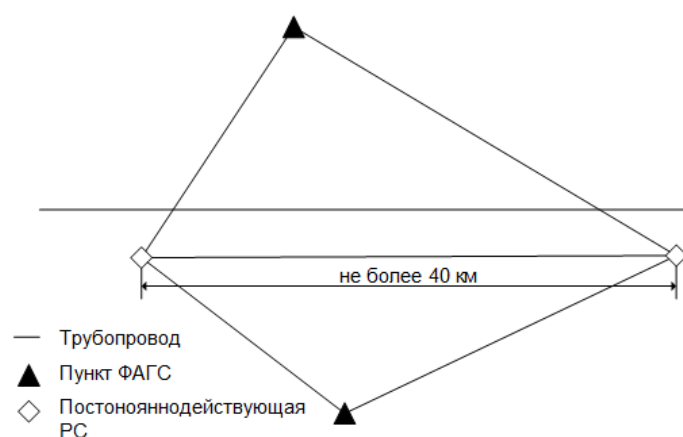


Рис. 2.Схема расположения референционных станций МАГС

При осуществлении геотехнического мониторинга наличие постоянно действующих референционных станций дает следующие преимущества:

- оптимизация состава работ при проведении воздушного лазерного сканирования;
- возможность круглосуточной работы;
- обеспечение безопасности и снижение рисков;
- создание единой платформы для сбора, хранения и анализа данных геодезических наблюдений;
- использование в работе современных ГНСС – методов и технологий получения координатно-высотных решений;
- исключение влияния человеческого фактора;
- снижение трудовых затрат на выполнение геодезических измерений.

Ключевыми задачами мониторинга трубопроводов являются:

- 1) определение пространственного положения трубопровода;
- 2) выявление, мониторинг и анализ опасных геологических, которые являются основным фактором потенциального влияния на изменение пространственного положения трубопровода.

Результаты

Магистральные трубопроводы характеризуются значительной протяженностью на труднодоступных территориях с распространением многолетних мерзлых грунтов. Что потребовало от ООО «НИИ Транснефть» поиска и апробации метода мониторинга, обеспечивающего:

- мониторинг протяженных трасс магистральных трубопроводов;
- выполнение полевых работ в короткие сроки;
- минимальное участие полевых бригад в наземных геодезических работах;
- точность и объективность информации о рельефе и пространственном положении объектов;

- сокращение влияния человеческого фактора при проведении обследований и обработке результатов измерений;
- полноту информации для оценки динамики экзогенных геологических процессов и перемещений грунта и объектов трубопровода;
- возможность автоматизации обработки результатов измерений;
- получение массива данных, необходимого и достаточного для разработки технических решений, направленных на повышение устойчивости трубопровода и обеспечение эффективной инженерной защиты.

В настоящее время геотехнический мониторинг на объектах МТ выполняется с использованием технологий цифровой аэросъемки и ВЛС. Накоплен богатый практический опыт проведения аэросъемочных работ и работ по геоинформационному обеспечению геотехнического мониторинга [14–16]. Методика обработки данных ВЛС предусматривает получение цифровой модели местности и цифровой модели рельефа (ЦМР) со средней плотностью ТЛО более 20 точек/м², а также ортофотоплана высокого пространственного разрешения (0,4 см) и плановой точности не менее 25 см. Помимо этого для исследования коридора трассы в процессе обработки данных мониторинга получают серию производных карт с шириной коридора 150–300 м.

В процессе исследования была разработана методика обработки и анализа результатов воздушного лазерного сканирования и цифровой аэросъемки, которая обеспечивает:

- дешифрирование объектов линейной части МТ (УОВ, УЗА, опоры ЛЭП, опоры МТ) [17, 18];
- определение пространственного положения объектов линейной части МТ;
- определение изменений пространственного положения объектов линейной части МТ между циклами мониторинга;
- выявление новых проявлений ЭГП;
- выявление динамики ЭГП между циклами мониторинга (изменение площади, глубины или высоты).
- классификация выявленных опасных геологических процессов;
- количественная оценка динамики проявлений ЭГП, произошедших за период между циклами мониторинга (ВЛС).

Для автоматизации процесса обработки результатов ВЛС разработаны и внедрены программные модули: автоматизированного анализа планово-высотного положения объектов МТ, а также автоматизированного анализа параметров сложных геологических условий расположения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС [19, 20] (рисунок 2).

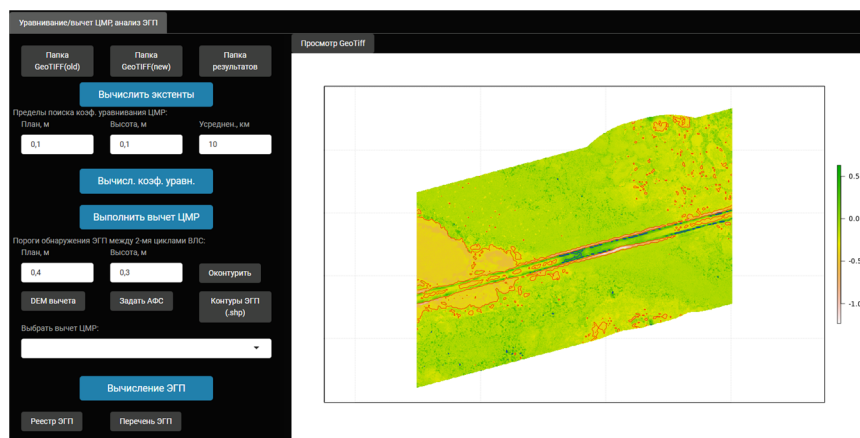


Рис.3. Автоматизированное выявление ЭГП в разработанном программном модуле [20]

Мониторинг средствами ВЛС осуществлялся для линейной части магистральных трубопроводов протяженностью более 6000 км. В процессе работы были получены следующие результаты:

- осуществлен контроль планово-высотного положения участков линейной части МТ на ММГ для более 6600 УОВ;
- проведен контроль отклонений от вертикали более 100 000 опор ЛЭП;
- выявление более 5 500 проявлений ЭГП в коридоре трассы МТ.

В процессе проведения геотехнического мониторинга магистральных трубопроводов средствами ВЛС накоплен существенный опыт, который позволяет судить о целесообразности развития местных автоматизированных геодезических сетей. На рисунке 3 приведены результаты взаимной увязки данных разных циклов мониторинга трубопровода средствами ВЛС в отсутствии МАГС, которые иллюстрируют ошибку между измерениями.

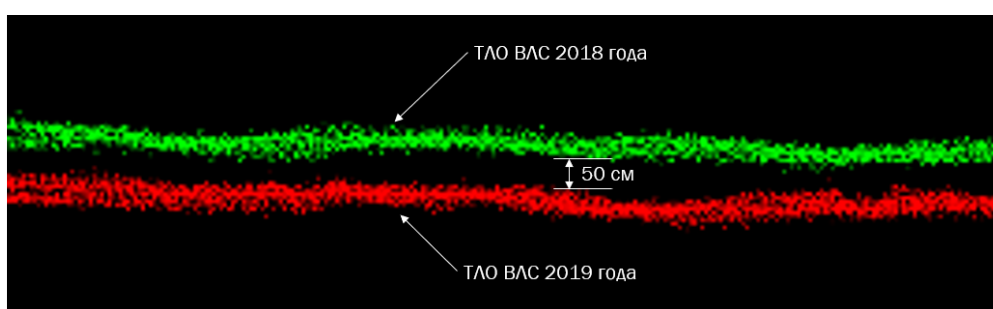


Рис. 3. Результаты сравнения ТЛО по данным ВЛС 2018–2019 гг. в отсутствии МАГС до применения системы уравнивания

Опыт обследований методом ВЛС на участках применения МАГС за последние 6 лет подтвердил, что использование МАГС повышает точность и достоверность определения ПВП объектов МТ, положения опор ЛЭП и оценки ди-

намики природной среды, а также оптимизацию работы на подготовку планово-высотного геодезического обеспечения ВЛС.

Заключение

Современные программные средства позволяют автоматизировать процесс обработки данных ВЛС с целью определения планово-высотного положения объектов МТ, параметров сложных геологических условий расположения объектов МТ и оценки их динамики. Это позволяет оптимизировать камеральные работы и минимизировать человеческий фактор при анализе результатов ВЛС, что повышает оперативность и достоверность получаемых результатов.

Разработанные ООО «НИИ Транснефть» подходы к организации геотехнического мониторинга с использованием средств ВЛС являются универсальными и могут быть применены на других протяженных линейных объектах для обеспечения их безопасной эксплуатации.

Перспективы развития дистанционных методов мониторинга на магистральных трубопроводах заключаются в создании дифференциальной подсистемы ГНСС на объектах мониторинга, а также в развитии автоматизированных средств обработки результатов лазерного сканирования протяженных трасс МТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макарычева, Е. М. методика районирования территории протяженных линейных объектов по условиям формирования термокарста / Е. М. Макарычева, В. П. Мерзляков, О. К. Миронов // Криосфера Земли. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 58–66. – DOI 10.15372/KZ20230106. – EDN OWALQR.
2. Макарычева Е. М., Ибрагимов Э. Р., Кузнецов Т. И., Шуршин К. Ю. Применение воздушного лазерного сканирования для геотехнического мониторинга объектов магистрального трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов: ООО «Транснефть-Медиа», Т. 9. – № 1. – Москва, 2019. – С. 21–31.
3. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте / Д. В. Долгополов, М. Ю. Баборыкин, Е. В. Жидиляева, В. А. Мелкий // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2(52). – С. 25–34. – DOI 10.25714/MNT.2022.52.003. – EDN YCMEZK.
4. Баборыкин М.Ю., Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Выявление опасных геологических процессов при проведении инженерно-геологических изысканий на основе цифровых моделей рельефа // Инженерные изыскания. 2015. № 2. С. 30–37.
5. Долгополов, Д. В. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования Земли / Д. В. Долгополов, М. Ю. Баборыкин, В. А. Мелкий // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 4, № 1. – С. 25–32. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32. – EDN CZDJRR.
6. Makarycheva, E. M. Geotechnical Monitoring of Pipeline Systems in Permafrost Conditions / E. M. Makarycheva, T. I. Kuznetsov, E. R. Ibragimov // International Conference «Solving the puzzles from Cryosphere»: Program, Abstracts, Pushchino, 15–18 апреля 2019 года. – Pushchino: Без издательства, 2019. – Р. 130–132. – EDN VLXOYB.
7. Долгополов, Д. В. Применение технологий дистанционного зондирования Земли для обеспечения геотехнического мониторинга и картографирования на трубопроводном транспорте / Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий, М. Ю. Баборыкин // Региональные геосистемы. – 2022. – Т. 46, № 3. – С. 339–355. – DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355. – EDN ABWPNH.

8. Lausch, Angela & Schaepman, Michael & Skidmore, Andrew & Catana, Eusebiu & Bannehr, Lutz & Bastian, Olaf & Borg, Erik & Bumberger, Jan & Dietrich, Peter & Cornelia, Glaesser & Hacker, Jorg & Höfer, Rene & Jagdhuber, Thomas & Jany, Sven & Jung, András & Karnieli, Arnon & Klenke, Reinhard & Kirsten, Toralf & Ködel, Uta & Baatz, Roland. (2022). Remote Sensing of Geomorphodiversity Linked to Biodiversity—Part III: Traits, Processes and Remote Sensing Characteristics. *Remote Sensing*. 2279. 10.3390/rs14092279.
9. Amelunke, Michael & Anderson, Carlton & Waldron, Margaret & Raber, George & Carter, Gregory. (2024). Influence of Flight Altitude and Surface Characteristics on UAS-LiDAR Ground Height Estimate Accuracy in *Juncus roemerianus* Scheele-Dominated Marshes. *Remote Sensing*. 16. 384. 10.3390/rs16020384.
10. Geotechnical Monitoring Of Pipelines Located In Difficult Climatic Conditions / E. M. Makarycheva, V. I. Surikov, T. I. Kuznetsov, D. V. Dolgoplov // 13 Pipeline Technology Conference, Berlin, 12–14 марта 2018 года. – Berlin: ESTREL CONVENTION CENTER, 2018. – P. 14–20. – EDN CWDGRQ.
11. Resop, Jonathan & Lehmann, Laura & Hession, W. (2019). Drone Laser Scanning for Modeling Riverscape Topography and Vegetation: Comparison with Traditional Aerial Lidar. *Drones*. 3. 35. 10.3390/drones3020035.
12. Jessin, Jeremy & Charlotte, Heinzlef & Long, Nathalie & Serre, Damien. (2023). A Systematic Review of UAVs for Island Coastal Environment and Risk Monitoring: Towards a Resilience Assessment. *Drones*. 7. 206. 10.3390/drones7030206.
13. М. С. Куприянов, М. П. Гасилин, Е. М. Макарычева, Т. И. Кузнецов. Организация высокоточной координатной системы на объектах магистральных трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 512–521.
14. Макарычева Е. М., Кузнецов Т. И., Половков С. А., Барышев А. И., Покровская Е. А. 3D-ГИС для сопровождения работ по геотехническому мониторингу объектов магистральных трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов: ООО «Транснефть-Медиа». – Т. 10. – № 4. – Москва, 2020. – С. 342–351.
15. Кузнецов, Т. И. Новые возможности для геотехнического мониторинга трубопроводных систем при использовании ГИС технологий с 3D визуализацией / Т. И. Кузнецов, Д. В. Долгополов // Трубопроводный транспорт – 2017 : тезисы докладов XII Международной учебно-научно-практической конференции, Уфа, 24–25 мая 2017 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2017. – С. 122–123. – EDN ZEMDIR.
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662888 Российская Федерация. Технологическая цифровая платформа мониторинга природно-технологической среды: № 2022662580: заявл. 07.07.2022: опубл. 07.07.2022 / Д. В. Долгополов, Р. А. Камашев, Д. С. Назаров, М. С. Удовиченко; заявитель Закрытое акционерное общество «Ай Ко». – EDN LLTLVA.
17. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения / Д. В. Долгополов, Д. В. Никонов, А. В. Полуянова, В. А. Мелкий // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 65–81. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81. – EDN BQCQZY.
18. Дешифрирование инфраструктуры магистральных трубопроводов по аэрокосмическим изображениям / Д. В. Долгополов, Д. В. Никонов, В. А. Мелкий, В. В. Братков // Мониторинг. Наука и технологии. – 2020. – № 2(44). – С. 19–25. – DOI 10.25714/MNT.2020.44.003. – EDN MOYFVT.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680590 Российская Федерация. Программный модуль автоматизированного анализа планово-высотного положения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС: № 2023680005: заявл. 29.09.2023: опубл. 03.10.2023 / Т. И. Кузнецов, А. И. Барышев, Е. А. Покровская [и др.] ; за-

явитель Публичное акционерное общество «Транснефть», Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть - Восток», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть - Дальний Восток», Акционерное общество «Транснефть - Сибирь». – EDN KBXQWB.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682372 Российская Федерация. Программный модуль автоматизированного анализа параметров сложных геологических условий расположения объектов МТ и их динамики по данным ВЛС: № 2023680694: заявл. 06.10.2023; опубл. 25.10.2023 / Т. И. Кузнецов, А. И. Барышев, Е. А. Покровская [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество «Транснефть», Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть – Восток», Общество с ограниченной ответственностью «Транснефть – Дальний Восток», Акционерное общество «Транснефть - Сибирь». – EDN FORHAO.

© Т. И. Кузнецов, Д. В. Долгополов, А. И. Барышев, 2025

Т. О. Перемитина¹✉, И. Г. Яценко¹

Геоэкологический мониторинг растительности арктических углеводородных территорий с использованием спутниковых данных

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии нефти
Сибирского отделения Российской академии наук (ИХН СО РАН),
г. Томск, Российская Федерация
e-mail: peremitinat@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование экологической обстановки нефтегазодобывающих регионов Западной Сибири с акцентом на оценку состояния растительного покрова. В работе представлены результаты многолетнего мониторинга улучшенного вегетационного индекса (Enhanced Vegetation Index, EVI) для анализа динамики восстановления растительных сообществ на территориях месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа. На основе обработки спутниковых данных MODIS с средним пространственным разрешением выполнены расчеты усредненных значений EVI за вегетационные сезоны 2013–2024 годов (период наблюдений с 25 мая по 20 сентября). Проведенные расчеты демонстрируют стабильный рост показателей: за период с 2013 по 2024 год средние значения вегетационного индекса увеличились на 10,6 %, что является объективным свидетельством улучшения состояния растительных сообществ. Наиболее выраженный прирост индекса EVI наблюдается в конце вегетационного периода, что может быть связано с активизацией процессов естественной регенерации растительности и общим улучшением экологических условий на исследуемых участках.

Ключевые слова: углеводородные месторождения, космические снимки, улучшенный вегетационный индекс, биота

T. O. Peremitina¹✉, I. G. Yashchenko¹

Geoeological monitoring of vegetation in arctic hydrocarbon territories using satellite data

¹Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tomsk, Russian Federation
e-mail: peremitinat@mail.ru

Abstract. The environmental conditions of oil and gas extraction regions in Western Siberia have been examined, with particular focus on the state of vegetative cover. This study presents findings from long-term monitoring of the Enhanced Vegetation Index (EVI), utilized to assess the regeneration dynamics of plant communities within the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug fields. By processing MODIS satellite data at moderate spatial resolution, mean EVI values were calculated for each growing season from 2013 to 2024, covering the observation period from May 25th to September 20th. The results indicate a consistent upward trend: over the analyzed span, average EVI values rose by 10.6%, providing clear evidence of enhanced vegetative health in these areas. Notably, the most significant increases in EVI were observed toward the end of the growing season, which may be attributed to intensified natural recovery processes and overall improvements in environmental conditions across the regions under study.

Keywords: hydrocarbon fields, satellite imagery, enhanced vegetation index, biota

Введение

Нефть и продукты ее переработки оказывают серьезное негативное воздействие на природные системы, причем вторичные соединения, образующиеся в процессе ее разложения, зачастую еще опаснее для живых организмов. Однако зависимость мировой экономики от углеводородного сырья не позволяет существенно снизить масштабы его извлечения из недр. На всех этапах нефтяного цикла – от добычи до перевозки и переработки – происходят аварийные ситуации, приводящие к выбросам нефтепродуктов. По данным экологов, от 30 до 50 % случаев загрязнения связаны с ошибками персонала, а 20–40 % – с износом или поломкой техники. В арктических широтах вероятность таких инцидентов возрастает из-за суровых климатических условий, которые усложняют эксплуатацию инфраструктуры.

Настоящая работа направлена на долгосрочный мониторинг экологической обстановки в районах нефтегазовых месторождений, расположенных за Полярным кругом. В качестве основного маркера состояния природной среды рассматривается растительность, поскольку она чутко реагирует на любые изменения, вызванные как деятельностью человека, так и естественными процессами.

Объект исследования

Изучение проводилось на территории Ямало-Ненецкого автономного округа, где расположены Вынгайхинское, Губкинское, Комсомольское и Тарасовское месторождения (рис. 1). Эти участки входят в состав Пуровского района, площадь которого превышает 102 тыс. км², а протяженность с севера на юг составляет около 720 км.

Регион отличается разнообразием ландшафтов: на севере преобладают редкостойные леса с лиственницей, елью и кедром, а южнее распространены лишайниковые боры с березами и соснами. Особенностью местности являются обширные мохово-лишайниковые болота, а также пойменные лугово-ивовые сообщества вдоль крупных рек. На Вынгайхинском и Комсомольском месторождениях значительные площади заняты сосновыми лесами с преобладанием кустистых лишайников.



Рис. 1. Исследуемые территории углеводородных месторождений ЯНАО
1 Губкинское, 2 Вынгайхинское, 3 Комсомольское, 4 Тарасовское

Согласно официальной статистике, предоставленной Департаментом охраны окружающей среды и природопользования Ямало-Ненецкого автономного округа [1], основным источником загрязнения экосистем региона выступают отходы, образующиеся при добыче минеральных ресурсов. Анализ данных (табл. 1) демонстрирует устойчивый рост количества таких отходов в течение рассматриваемого периода.

Особенно выделяется 2020 год, где зафиксирован резкий скачок показателей, что, по-видимому, обусловлено изменениями в производственных процессах из-за ограничений, введенных во время пандемии коронавируса. Однако уже в 2022 году ситуация кардинально изменилась: объемы отходов, отправленных на захоронение или временное хранение, существенно сократились, тогда как доля утилизированных отходов заметно возросла. Это указывает на улучшение системы обращения с отходами в регионе.

Наиболее значительный прогресс наблюдается в 2023 году – почти 70 % всех образовавшихся отходов были переработаны и вовлечены в повторное использование. Такой результат во многом обеспечен деятельностью нефтегазовых компаний, активно внедряющих технологии утилизации буровых отходов.

Таблица 1

Сведения об образовании, утилизации, обезвреживании и размещении отходов производства и потребления по Ямало-Ненеckому а.о. за 2013-2024 гг.

Год	Количество образовавшихся отходов (тыс. т)	Количество утилизированных отходов (тыс. т)	Количество обезвреженных отходов (тыс. т)	Количество размещенных отходов (тыс. т)
2013	652,20	291,9	290,3	329,2
2014	625,20	216,5	569,5	292,3
2015	635,60	331,6	362,4	196,1
2017	930,40	446,9	48,0	138,3
2018	939,40	721,3	21,6	171,6
2019	1729,00	1350,6	123,4	190,0
2020	487,70	464,5	48,7	193,7
2021	1882,97	1645,4	42,3	223,5
2022	2593,77	2157,9	70,9	75,5
2023	2744,50	1900,4	75,1	474,8

Особенности арктических нефтегазовых месторождений, включая экстремальные климатические условия, труднодоступность территорий, повышенную чувствительность природных комплексов и замедленные темпы регенерации флоры после антропогенного воздействия, обуславливают необходимость регулярного мониторинга состояния растительности. В этом контексте особую актуальность приобретает исследование трансформаций растительного покрова на

территории Ямало-Ненецкого АО с применением общедоступных материалов космической съемки.

Методы и материалы

В ходе исследования для мониторинга состояния растительных сообществ в районах нефтегазодобычи были задействованы данные, полученные спектро-радиометром MODIS космического аппарата Terra.

В соответствии с нормативным документом Рослесхоза (№ 472 от 10.11.2011 в редакции от 15.03.2018) [2], временные границы вегетационного сезона для территории ЯНАО определены с 1 июня по 1 октября, что составляет 122 дня. Для анализа выбраны восемь 16-дневных композитных снимков MOD13Q1 [3] (табл. 2). Такой временной охват позволяет наиболее точно отследить динамику растительного покрова в течение всего периода активной вегетации.

Таблица 2

Перечень используемых композитов MOD13Q1 за период 2013–2024 гг.

Идентификатор композита	Период 16-дневного интервала
145	10 июня – 25 июня
161	26 июня – 7 июля
177	7 июля – 27 июля
193	28 июля – 12 августа
209	13 августа – 28 августа
225	29 августа – 13 сентября
241	14 сентября – 20 сентября
257	10 июня – 25 июня

В более ранних научных работах [4] авторами были детально проанализированы методологические подходы к отслеживанию динамики растительных сообществ на территориях нефтегазовых месторождений с применением различных вегетационных показателей. Особое внимание уделялось возможностям этих индексов в оценке продуктивности фитоценозов и определении запасов органической массы [5].

В рамках текущего исследования был выбран усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index, EVI), обладающий рядом преимуществ для анализа трансформации растительного покрова. Основное достоинство данного показателя заключается в его меньшей зависимости от фоновых помех, связанных с почвенным покровом и атмосферными условиями.

Шкала значений EVI охватывает диапазон от -1 до 1, обеспечивая высокую точность соответствия между расчетными показателями и фактическим состоянием растительных сообществ. Согласно имеющимся данным [6], для нормально развивающихся растительных ассоциаций Ямало-Ненецкого региона типичны значения индекса в пределах 0,2–0,4, что свидетельствует об их удовлетворительном физиологическом состоянии.

Результаты и обсуждение

В рамках исследования проведен комплексный анализ динамики растительности на территории нефтегазовых месторождений с использованием современных ГИС-технологий. Для обработки данных применялся ArcGIS версии 10.8. На первом этапе работы в геоинформационной системе созданы векторные полигоны, точно соответствующие границам четырех исследуемых углеводородных месторождений (рис. 1).

Основу анализа составили спутниковые снимки MOD13Q1, охватывающие период с 2013 по 2024 год, с информацией об индексе вегетации EVI (Enhanced Vegetation Index). Процесс обработки данных включал применение инструмента зональной статистики, который позволяет рассчитывать средние значения вегетационного индекса для заданных территориальных единиц. Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 2, где четко прослеживается динамика изменения средних значений индекса EVI за весь период наблюдений. Такой подход позволил получить объективную оценку состояния растительного покрова и его изменений под влиянием природных и антропогенных факторов.

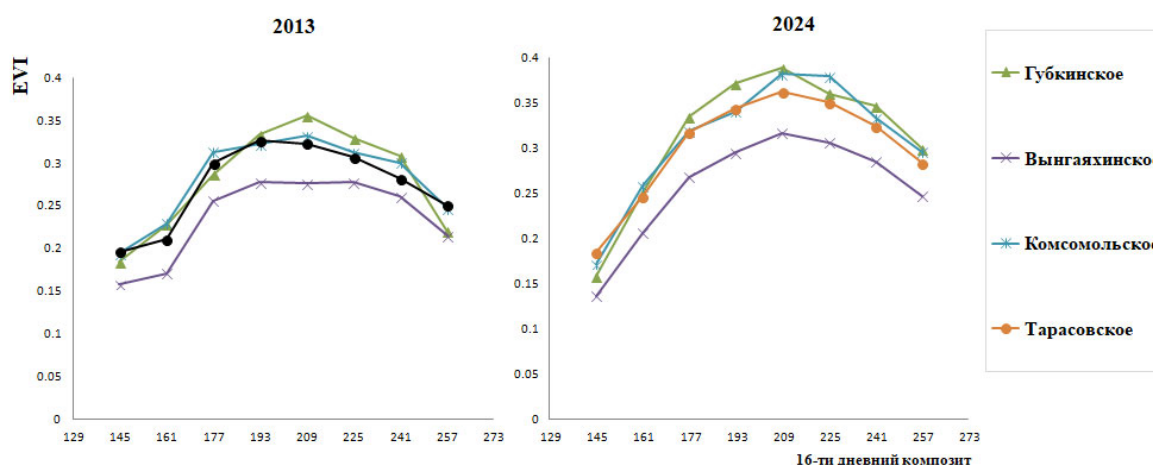


Рис. 2. Динамика изменения средних значений индекса EVI вегетационных периодов 2013–2024 гг.

В начале вегетационного периода (145-й композит) 2013 года растительный покров четырех месторождений углеводородов характеризовался относительно низкими значениями индекса EVI, которые не превышали 0,1961 при минимальном показателе 0,1184. Спустя десятилетие, в 2024 году, диапазон изменился незначительно – от 0,1367 до 0,1856. Несмотря на сокращение верхней границы, средний уровень индекса продемонстрировал рост примерно на 2,5 %, что может указывать на постепенную стабилизацию растительных сообществ.

К концу вегетационного сезона (257-й композит) различия между годами стали более выраженными. Если в 2013 году EVI колебался в пределах 0,2145–0,2504, то к 2024 году его значения существенно увеличились, достигнув 0,2474–

0,2998. Такой прирост (в среднем 17,7 %) свидетельствует о восстановительных процессах в экосистемах, вероятно, связанных с изменением антропогенной нагрузки или естественными сукцессионными изменениями.

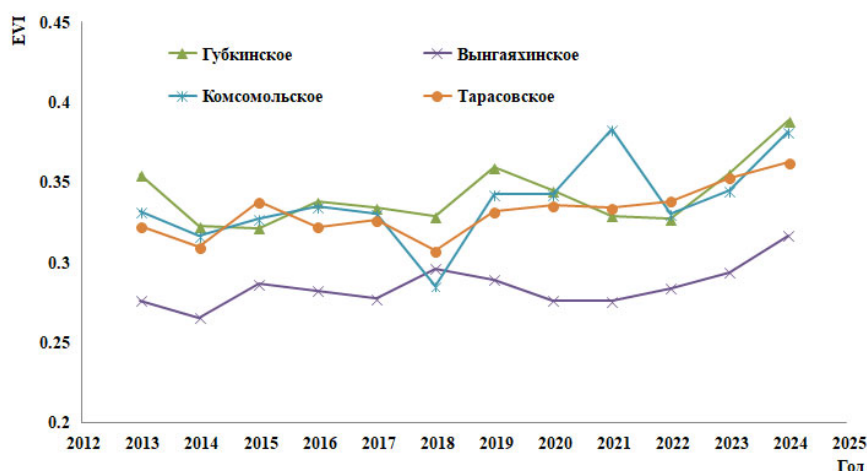


Рис. 3. Динамика изменения средних значений индекса EVI с 28 июля – 12 августа (209-й композит)

Результаты указывают на увеличение продолжительности вегетационного сезона растительных сообществ. Данная тенденция, вероятно, обусловлена глобальными климатическими изменениями, в частности устойчивым повышением температурного фона, наблюдаемым в течение последних десяти лет.

Исследование включало оценку изменений индекса растительности EVI на стадии пиковой вегетации (с 28 июля по 12 августа) за одиннадцатилетний период наблюдений с 2013 по 2024 год. Полученные данные охватывают четыре контрольных участка углеводородных месторождений (рис. 3). Анализ среднегодовых показателей EVI в период максимального развития растительности (рис. 3) выявил сходные закономерности на всех изучаемых территориях. Наибольшие величины индекса зафиксированы в 2013, 2019 и 2024 годах, тогда как самые низкие значения характерны для 2014 и 2018 годов.

Среди всех изученных объектов наиболее показательным оказалось Вынгаяхинское месторождение. На протяжении всего периода наблюдений здесь регистрировались минимальные показатели вегетационного индекса EVI, варьирующиеся в диапазоне 0,2657–0,3169. Такие особенности обусловлены спецификой местного ландшафта, для которого характерны обширные заболоченные площади с преобладанием травянистой растительности, кустарничково-моховых сообществ и многочисленных мелководных озерных образований. Примечательно, что в 2024 году на данном участке отмечен значительный подъем индекса EVI до максимального значения 0,3169, что может рассматриваться как индикатор улучшения состояния растительных сообществ. Полученные данные

позволяют говорить о формировании устойчивой положительной динамики в восстановлении природных комплексов на территориях нефтегазодобычи.

Проведенный анализ данных по обращению с отходами производства и потребления в Ямало-Ненецком автономном округе (табл. 1) в сопоставлении с динамикой вегетационного индекса EVI выявил интересную закономерность. В периоды повышенного образования отходов (2019, 2021, 2022 гг.) растительные сообщества демонстрировали стабильно высокие показатели EVI, свидетельствующие об их хорошем состоянии. В то же время годы со сниженными значениями индекса (2014, 2018 гг.) соответствовали периодам с умеренным или пониженным объемом отходов.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об отсутствии выраженной отрицательной корреляции между количеством образующихся отходов и состоянием растительного покрова. Вероятно, существующая система утилизации и обезвреживания отходов достаточно эффективно минимизирует их потенциальное негативное воздействие на окружающие экосистемы.

Заключение

Проведенный анализ спутниковых данных подтвердил, что применение вегетационного индекса EVI является эффективным инструментом для мониторинга динамики растительного покрова в условиях арктических нефтегазовых месторождений, демонстрируя не только текущее состояние экосистем, но и их многолетние изменения под влиянием природных и антропогенных факторов. Сравнительный анализ данных выявил устойчивую положительную динамику: в 2024 году средние значения индекса превысили базовый уровень 2013 года на 10,6 %.

Проведенные исследования подтвердили эффективность использования спутникового мониторинга для количественной оценки экологического статуса труднодоступных арктических территорий. Полученные результаты имеют значительную практическую ценность для организации системы экологического контроля и управления в условиях Крайнего Севера. *Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР 121031500046-7).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доклад об экологической ситуации в Ямало-Ненецком автономном округе в 2023 году [Электронный ресурс]. URL: <https://dpr.yanao.ru/documents/other/357052/> (дата обращения: 13.05.2025).
2. Приказ Рослесхоза от 10.11.2011 № 472 (ред. от 15.03.2018) «Об утверждении Методических рекомендаций по проведению государственной инвентаризации лесов» // <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rosleskhoza-ot-10112011-n-472-ob/> (дата обращения: 14.05.2025)
3. Официальный сайт радиометра MODIS: описание системы TERRA и сканера MODIS [Электронный ресурс]. URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov>. (дата обращения: 13.05.2025)
4. Пространственно временная динамика вегетационного индекса EVI (Enhanced Vegetation Index) в разных типах ландшафтов Брянской области / Г. В. Лобанов, А. Ф. Зайцева,

А. В. Полякова [и др.] // Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований. – 2012. – № 3(3). – С. 46–52.

5. Перемитина Т.О., Яценко И. Г. Применение спутниковых данных terra-modis для мониторинга состояния растительного покрова нефтедобывающих территорий Томской области // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sputnikovyh-dannyh-terra-modis-dlya-monitoringa-sostoyaniya-rastitelnogo-pokrova-neftedobyvayuschih-territoriy-tomskoj> (дата обращения: 14.05.2025).

6. Перемитина Т. О., Яценко И. Г. Анализ состояния растительного покрова нефтедобывающих комплексов Томской области // Химия в интересах устойчивого развития. – 2020. – Т. 28, № 3. – С. 288–293.

© Т. О. Перемитина, И. Г. Яценко, 2025

А. С. Степанов¹✉, Е. А. Фомина^{1,2}, А. А. Холодков¹

Изучение состояния посевов сои юга Дальнего Востока по данным дистанционного и наземного мониторинга

¹Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства,
с. Восточное, Хабаровский край, Российская Федерация

²Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск, Российская Федерация
e-mail: stepanfx@mail.ru

Аннотация. Соя является основной культурой Дальнего Востока. При организации системы точного земледелия состояние посевов сои в ходе вегетационного сезона изучается с помощью дистанционного зондирования. В работе представлены основные характеристики временных рядов NDVI посевов сои отдельных полей Хабаровского края и Еврейской автономной области, сформированных по результатам ежемесячной съемки DJI Mavic3M в вегетационном сезоне 2024. Календарный день наступления максимума NDVI находился в диапазоне от 220 до 231, средние значения максимума от 0,87 до 0,95. Внутриполевая вариабельность этих показателей находилась в пределах 10 %. По результатам проведенного агрохимического анализа отобранных почвенных образцов было установлено, что содержание подвижного калия, фосфора, аммонийного азота и pH соответствовали тяжелосуглинистым слабо-кислым почвам с низким плодородием. Были выявлены корреляционные связи между значениями NDVI, влажностью и содержанием калия.

Ключевые слова: мониторинг, соя, Дальний Восток, дистанционное зондирование

A. S. Stepanov¹✉, E. A. Fomina^{1,2}, A. A. Kholodkov¹

Study of soybean crops in the south of The Far East Based on remote and ground monitoring data

¹Far-Eastern Agriculture Research Institute, Vostochnoe, Khabarovskii krai, Russian Federation

²Computing Center FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation
e-mail: stepanfx@mail.ru

Abstract. Soybeans are the main crop of the Far East. When organizing a precision farming system, the condition of soybean crops during the growing season is studied using remote sensing. The paper presents the main characteristics of the NDVI time series of soybean crops in individual fields of the Khabarovsk Territory and the Jewish Autonomous Region, formed based on the results of the monthly DJI Mavic3M survey in the 2024 growing season. The calendar day of the NDVI maximum was in the range from 220 to 231, with average maximum values from 0,87 to 0,95. The intrafield variability of these parameters was within 10 %. According to the results of the agrochemical analysis of the selected soil samples, it was found that the content of mobile potassium, phosphorus, ammonium nitrogen and pH corresponded to heavy loamy slightly acidic soils with low fertility. Correlations were found between NDVI values, humidity, and potassium content.

Keywords: monitoring, soybean, Far East, remote sensing

Введение

Соя является одной из ключевых мировых сельскохозяйственных культур, в последнее время уделяется большое внимание развитию методов оценки состо-

яния посевов, исследованию продуктивности полей для получения высоких урожаев сои и обеспечения качества продукции [1, 2]. Дальневосточные регионы России, в том числе Еврейская автономная область (ЕАО) и Хабаровский край традиционно входят в число территорий, где соя является основной возделываемой культурой, площади посевов сои в 2024 г. по данным Росстата занимали более 88 % пахотных земель ЕАО и 58 % пахотных земель Хабаровского края [3].

Организация системы точного земледелия подразумевает исследование внутривидовой и межвидовой вариативности посевов сельскохозяйственных культур с использованием современных методов информационного обеспечения, в том числе на основе данных дистанционного зондирования Земли, полученных со спутников и БПЛА [4]. Использование БПЛА, несмотря на более высокие затраты в сравнении со спутниковыми данными, является оправданным при изучении неоднородностей полей малого размера, отсутствия спутниковых снимков из-за облачности, и ряда других причин. Для прогнозирования потенциальной урожайности сои с помощью БПЛА проводится мониторинг показателей фотосинтетической деятельности (оценка значений индексов вегетации, полученных в результате обработки данных аэрофотосъемки) [5]. Проведенные ранее исследования показали, что показатели продуктивности сои и характеристики почвы коррелируют между собой [6], при этом определенное преимущество при сравнительном исследовании состояния посевов сои представляют регулярные спутниковые данные и сформированные на их базе временные ряды значений NDVI.

Цель настоящего исследования – подготовка и построение временных рядов NDVI по данным аэрофотосъемки 2024 г. для отдельных полей сои Хабаровского края и ЕАО, оценка основных характеристик временных рядов, отбор почвенных образцов на полях и определение агрохимических показателей.

Методы и материалы

Исследование проводилось в Хабаровском районе Хабаровского края, Сидовичском районе Еврейской автономной области. Для четырех полей с соей произведена шестикратная аэрофотосъемка БПЛА DJI Mavic3M в мае, июне, июле, августе, сентябре и октябре 2024. Для каждого пикселя были сформированы временные ряды значений NDVI (для аппроксимации применялась двойная логистическая функция).

В конце мая 2024 г. (до сева и внесения удобрения в почву) и в конце октября 2024 г. (после уборки) на опытных полях был произведен отбор почвенных проб и проведен агрохимический анализ. Определялись следующие показатели: влажность, pH, содержание подвижного калия и фосфора, аммонийного азота.

Результаты

Как видно из рисунка 1, аппроксимированные кривые сезонного хода NDVI для трех полей имели практически схожую форму, календарные дни максимума NDVI и численные значения максимума. Отличие поля Соя1 ЕАО обусловлено тем, что оно было впервые введено в оборот после длительного периода. Вари-

абельность значений NDVI на этом поле также превышала вариабельность на других полях практически в течении всего вегетационного сезона (рис. 2). Минимальные значения коэффициентов вариации временных рядов NDVI приходились на соответствующие $NDVI_{max}$ календарные дни. Высокие значения коэффициентов вариации в начале и конце сезона обусловлены неравномерностью всходов и созревания сои.

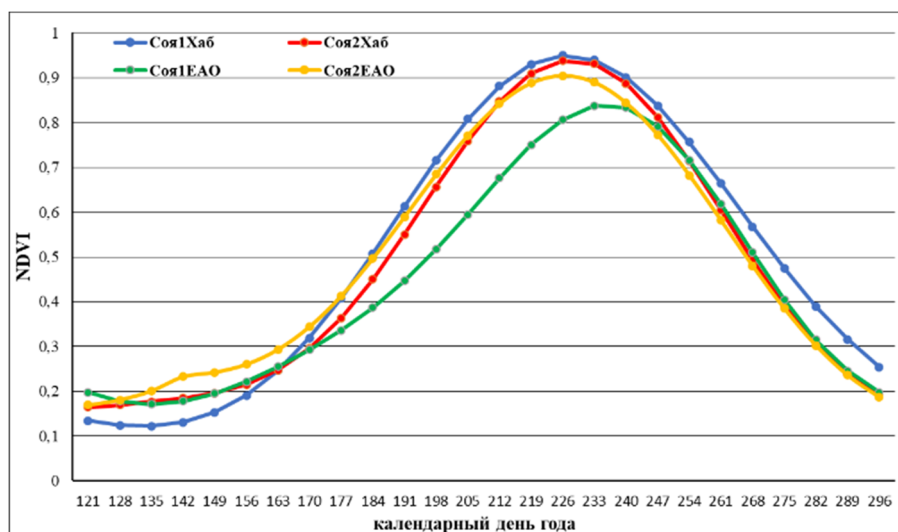


Рис. 1. Аппроксимированные временные ряды значений NDVI (DJI Mavic3M, 2024 г.) для полей с посевами сои ЕАО и Хаб. края

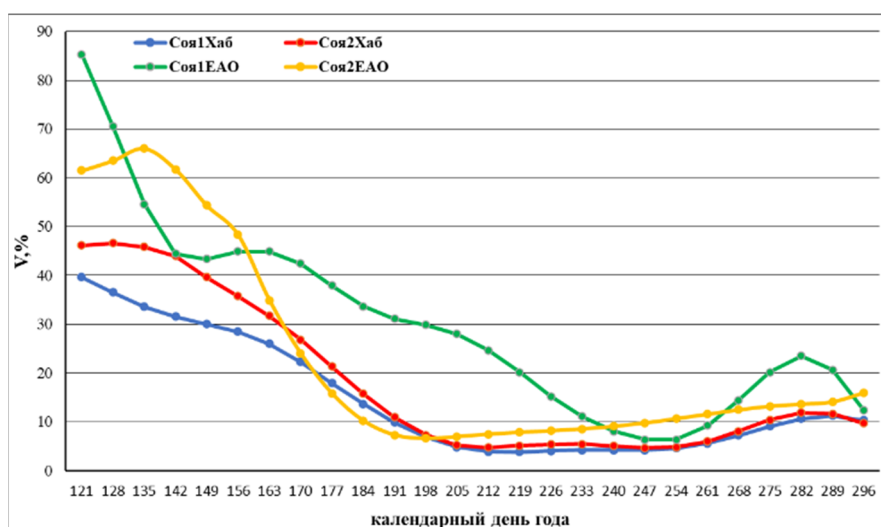


Рис. 2. Вариабельность значений NDVI (DJI Mavic3M, 2024 г.) для полей с посевами сои ЕАО и Хаб. края

Как следует из таблицы 1, значения максимума NDVI на полях Хабаровского края и Соя2 ЕАО находились в диапазоне 0,92-0,95, а для поля Соя1 – 0,87. Коэффициент вариации максимума NDVI выше на полях ЕАО.

Таблица 1

Основные характеристики временных рядов NDVI изучаемых полей с посевами сои (DJI Mavic3M, 2024 г.)

Характеристики	Наименование поля			
	Соя1Хаб	Соя2Хаб	Соя1ЕАО	Соя2ЕАО
$\overline{NDVI_{max}} \pm \Delta \overline{NDVI_{max}}$	0,95±0,01	0,94±0,01	0,87±0,04	0,92±0,01
VAR_{NDVI}	3,1`	4,5	8,2	10,2
$\overline{DOY_{max}} \pm \Delta \overline{DOY_{max}}$	220,8±0,1	225,8±0,1	233,1±0,2	219,7±0,2
VAR_{DOY}	2,5	4,4	5,3	10,5

На рисунке 3 представлена диаграмма размаха значений максимума временных рядов NDVI для исследуемых полей с соей. Как видно, наибольший разброс характерен для поля Соя1 ЕАО – от 0,82 до 0,91.

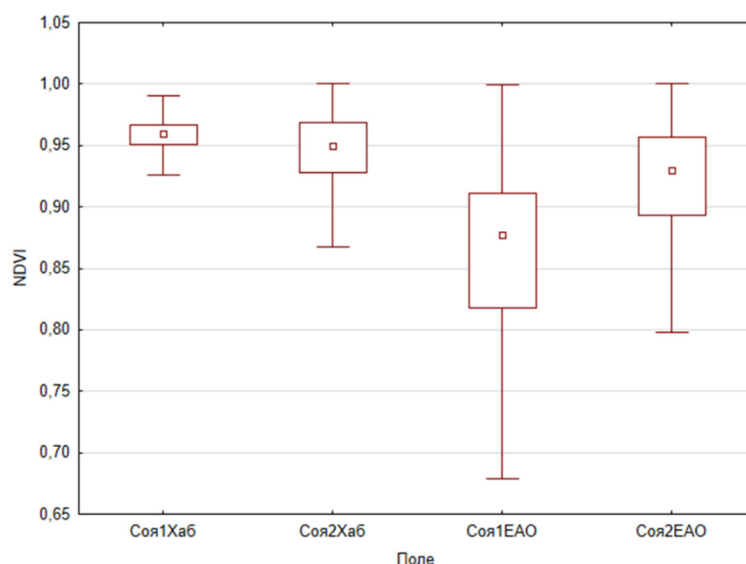


Рис. 3. Диаграмма размаха значений максимума временных рядов NDVI (DJI Mavic3M, 2024 г.) для пикселей полей с посевами сои ЕАО и Хаб. края

Содержание N-NO₃, а также подвижных форм P₂O₅ и K₂O в начале сезона находилось в интервале от 2,5 до 3,3 мг/кг, от 2,1 до 4,5 мг/100г, и 3,36–10,3 мг/100г соответственно. К октябрю увеличилось содержание аммонийного азота до 3,4–4,7 мг/100г в Хабаровском крае и ЕАО, а содержание подвижного калия снизилось. В среднем, значения этих показателей соответствовали лугово-бурый тяжелосуглинистым почвам с низким плодородием. Влажность почв с посевами сои в ЕАО в течении всего сезона была стабильно выше – 24,1 % – 29,3 %, в то время как в Хабаровском крае влажность изученных полей не превышала 22 %. Кислотность почвы соответствовала кислым и слабо-кислым почвам – на полях Хабаровского края pH принадлежало интервалу 4,1–5,0; на полях ЕАО – 4,5–5,4.

Были выявлены корреляционные связи между значениями NDVI, влажностью и содержанием калия.

Заключение

Аппроксимированные кривые сезонного хода значений NDVI, построенные по данным шестикратной БПЛА съемки полей с соей в ходе одного вегетационного сезона, имеют характерную форму, соответствующую основным фазам развития сои, устойчивый максимум в период 220–233 календарный день года. Аппроксимированные временные ряды могут служить для оценки неоднородностей развития посевов по окончании сезона для планирования мероприятий по их устранению.

Полученные результаты по оценке пространственных и временных распределений показателей продуктивности (NDVI), подвижных форм калия и фосфора, влажности и кислотности подготовили основу для проведения дальнейших исследований, связанных с построением математических моделей управления почвенными ресурсами для повышения эффективности соевого производства Дальнего Востока.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ, проект № 2376-00007 на тему «Разработка научных методов и подходов устойчивого управления почвенными ресурсами на основе технологий дистанционного зондирования Земли (на примере юга Дальнего Востока)».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Синеговская, В. Т. Научное обеспечение эффективного развития селекции и семеноводства сои на Дальнем Востоке [Текст] / В. Т. Синеговская // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2021. – Т. 25. – №. 4. – С. 374–380.
2. Martignone, G. The rise of Soybean in international commodity markets: A quantile investigation [Text] / G. Martignone, B. Ghosh, D. Papadas, K. Behrendt // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – 469–489.
3. Федеральная служба государственной статистики (РОССТАТ). Посевные площади Российской Федерации в 2024 году [Электронный ресурс] Официальный сайт. – Режим доступа: http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/posev-4cx_2024.xlsx.
4. Загоруйко, М. Г. Мониторинг показателей фотосинтетической деятельности и его использование для прогнозирования потенциальной урожайности сои [Текст] / М. Г. Загоруйко, М. Е. Бельштина, Р. К. Курбанов, Н. И. Захарова // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 12. – С. 9–12.
5. Якушев В. П. Точное земледелие: теория и практика. – СПб. : ФГБНУ АФИ, 2016. – 364 с.
6. Степанов, А. С., Исследование внутриполевых неоднородностей развития посевов сои по данным ДЗЗ и свойствам пахотного горизонта (на примере юга Дальнего Востока) / А. С. Степанов, Г. В. Харитонов, Т. А. Асеева и др. // Российская сельскохозяйственная наука. – 2024. – № 4. – С. 8–13.

© А. С. Степанов, Е. А. Фомина, А. А. Холодков, 2025

Д. А. Гура^{1,2}, Р. А. Дьяченко¹, Т. А. Тихонов¹✉

Применение алгоритма CANUPO для классификации точек лазерного отражения

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

²Кубанский государственный аграрный университет,
г. Краснодар, Российская Федерация
e-mail: timka2015@yandex.ru

Аннотация. Исследование посвящено оценке возможностей применения алгоритма CANUPO для автоматической классификации облаков точек лазерного отражения в программном обеспечении CloudCompare. Актуальность работы обусловлена ограниченной универсальностью существующих методов. CANUPO, в отличие от ресурсоемких нейросетевых подходов, реализует бинарную классификацию на основе многомасштабного анализа геометрических признаков, демонстрируя устойчивость к шуму и эффективность при малом объеме обучающих данных. В работе проведен анализ параметров алгоритма, выполнена классификация природного ландшафта острова Гуадалупе (растительность, естественная поверхность) и сравнение с ручным методом. Результаты подчеркивают практическую значимость CANUPO для задач с выраженными геометрическими различиями классов, а также необходимость развития гибридных решений, сочетающих алгоритмическую обработку с экспертным анализом для повышения точности и адаптивности в условиях роста объемов 3D-данных.

Ключевые слова: автоматическая классификация, нейронная сеть, алгоритм CANUPO, бинарные данные, идентификация, кадастр

D. A. Gura^{1,2}, R. A. Dyachenko¹, T. A. Tikhonov¹✉

Application of CANUPO algorithm to classify laser reflection points

¹Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

²Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation
e-mail: timka2015@yandex.ru

Abstract. The study is devoted to assessing the capabilities of the CANUPO algorithm for automatic classification of laser reflection point clouds in CloudCompare software. The relevance of the work is due to the limited universality of existing methods. CANUPO, unlike resource-intensive neural network approaches, implements binary classification based on multi-scale analysis of geometric features, demonstrating resistance to noise and efficiency with a small volume of training data. The paper analyzes the algorithm parameters, classifies the natural landscape of Guadalupe Island (vegetation, natural surface) and compares it with the manual method. The results emphasize the practical importance of CANUPO for problems with pronounced geometric differences between classes, as well as the need to develop hybrid solutions that combine algorithmic processing with expert analysis to improve accuracy and adaptability in the face of growing 3D data volumes.

Keywords: automatic classification, neural network, CANUPO algorithm, binary data, identification, cadastre

Введение

Автоматическая классификация точек лазерного отражения является актуальным на сегодня направлением, особенно в контексте задач распознавания объектов для кадастрового учета. Классифицированное облако точек упорядочивает хаотичный набор данных, что упрощает анализ и интерпретацию информации. Таким образом, классификация превращает набор «сырых» 3D-данных в осмысленную структуру, обеспечивая возможность работы с классифицированными материалами, что критически важно для идентификации объектов [1].

Проблема автоматической классификации облаков точек заключается в ограниченной универсальности существующих методов, которые ориентированы на узкие классы задач. Например, нейронная сеть PointNet++, несмотря на наличие предобученных весов, не адаптирована для большинства реальных задач, таких как детекция природных ландшафтов или распознавание сложных объектов [1, 2]. Данный факт обуславливает необходимость обучения модели на обширных наборах данных, охватывающих разнообразные условия. Также можно привести в пример другое программное обеспечение «Reclouds» от российских разработчиков «Нанософт» с модулем «Сегментация», которое ограничено классификацией промышленных объектов, таких как трубы или металлоконструкции, и не подходит для задач трехмерной идентификации в системах кадастра или экологического мониторинга.

Среди методов классификации облаков точек выделяется алгоритм CANUPO. Этот метод машинного обучения с контролируемым подходом специализирован на бинарной сегментации пространственных данных. В отличие от ресурсоемких нейросетевых архитектур, CANUPO реализует многомасштабный анализ локальных геометрических признаков, что демонстрирует устойчивость к шуму и вариативности плотности точек [3]. Ключевое преимущество алгоритма – возможность создания пользовательских классификаторов или использования готовых моделей, обучаемых на ограниченных выборках данных. Такая гибкость обеспечивает точную классификацию даже при малом объеме размеченных данных, что особенно ценно для детекции малозаметных объектов в условиях плотной застройки [4].

Задачи исследования:

1. Анализ автоматической классификации в CloudCompare с использованием CANUPO;
2. Сравнение автоматической и ручной классификации;
3. Оценка прикладной применимости CANUPO.

Методы и материалы

Исследование проводилось в ПО CloudCompare с открытым исходным кодом для работы с облаками точек и полигональными сетями. Оно позволяет загружать, визуализировать, редактировать и анализировать данные, полученные из технологии лазерного сканирования. CloudCompare поддерживает широкий набор инструментов, включая импорт и экспорт необходимых форматов, реги-

страцию и обработку облаков точек, вычисление расстояний между ними, сегментацию и многомасштабную классификацию [5].

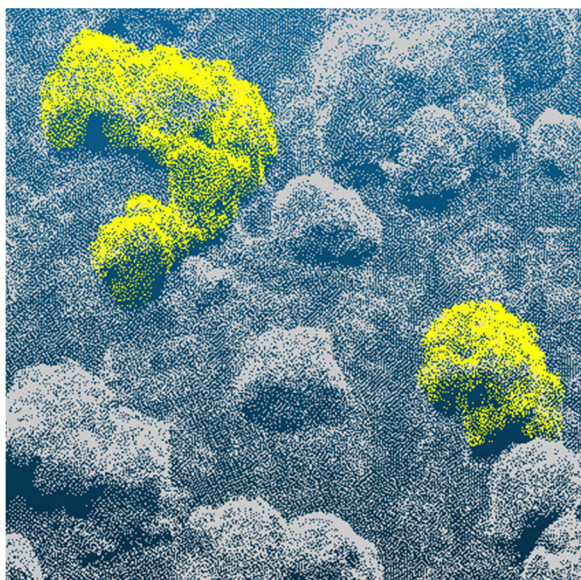
Исходные данные для изучения возможностей алгоритма автоматической классификации взяты с открытого источника “OpenTopography” (<https://portal.opentopography.org/datasets>). Набор данных представлен облаком точек 2019 года острова Гуадалупе в Мексике (рис. 1).



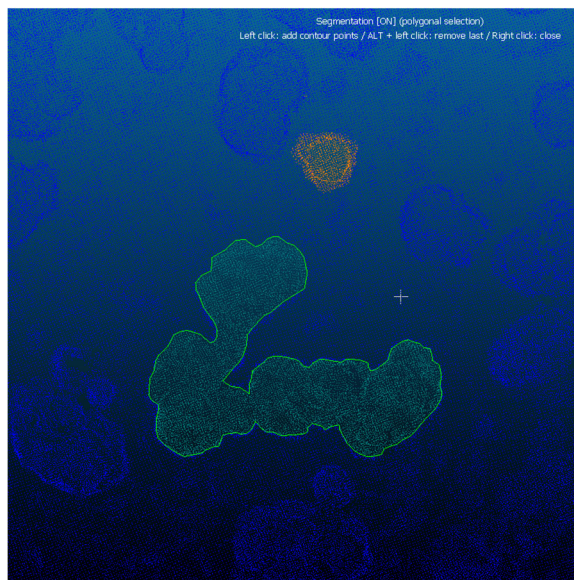
Рис. 1. Облако точек в RGB острова Гуадалупе в Мексике 2019 года

Важной особенностью CANUPO является его ориентация исключительно на геометрические данные. Если различия в облаке точек обусловлены только интенсивностью или информацией RGB, алгоритм не даст нужного результата.

Создание пользовательского классификатора в CANUPO начинается с формирования репрезентативной выборки классов. Это эталонные подмножества данных, которые характеризуют объекты различных классов [6]. Выборка может быть создана двумя методами. Первый метод заключается в интерактивной сегментации, при которой объекты выделяются в основном облаке точек с помощью инструментов геометрического анализа с последующим присвоением уникального идентификатора классу. Второй метод включает ручную разметку, предполагающая непосредственное выделение точек, принадлежащих определенному классу (Рис. 2). Ключевыми критериями качества выборки являются репрезентативность, требующая включения всех вариаций объектов внутри класса (размер, форма, ориентация) для минимизации риска переобучения, и сбалансированность, обеспечивающая равномерное распределение примеров для предотвращения смещения модели в сторону доминирующего класса (рис. 3).



а)



б)

Рис. 2. Создание классификаторов для обучения алгоритма: а) метод ручной классификации; б) метод сегментации

Плагин Canuro в CloudCompare позволяет гибко настраивать параметры многомасштабного анализа через три ключевые настройки:

- минимальный диаметр (Min scale);
- максимальный диаметр (Max scale);
- шаг (Step).

Вышеперечисленные параметры определяют, как алгоритм анализирует геометрические особенности точек на разных уровнях детализации. Минимальный диаметр определяет наименьший радиус окрестности вокруг точки, в пределах которого анализируется ее геометрическая структура, а максимальный диаметр задает наибольший радиус окрестности для анализа. (Min scale должен быть меньше типичного размера самых мелких целевых объектов, а Max scale должен превышать размер крупных объектов). Step (шаг) - указывает интервал между последовательными масштабами (радиусами). Чем меньше шаг, тем больше масштабов будет проанализировано, что повышает точность, но существенно замедляет обработку. Обученный классификатор сохраняется в формате *.prn. Для оптимизации рабочего времени автоматическую классификацию объектов рекомендуется выполнять на небольших участках.

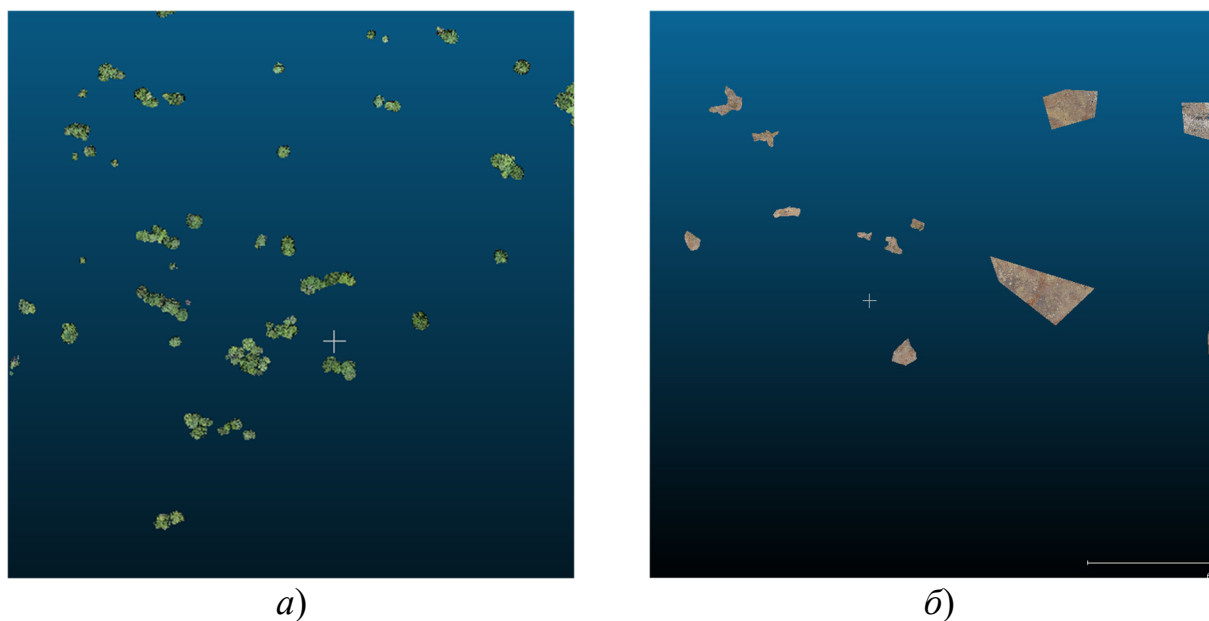


Рис. 3. Выборка классов: *а)* класс растительность; *б)* класс естественная поверхность

Результаты

После обучения и применения классификатора на массиве данных формируется классифицированное облако точек, разделенное на два класса:

1. Растительность;
2. Естественная поверхность (рис. 4).

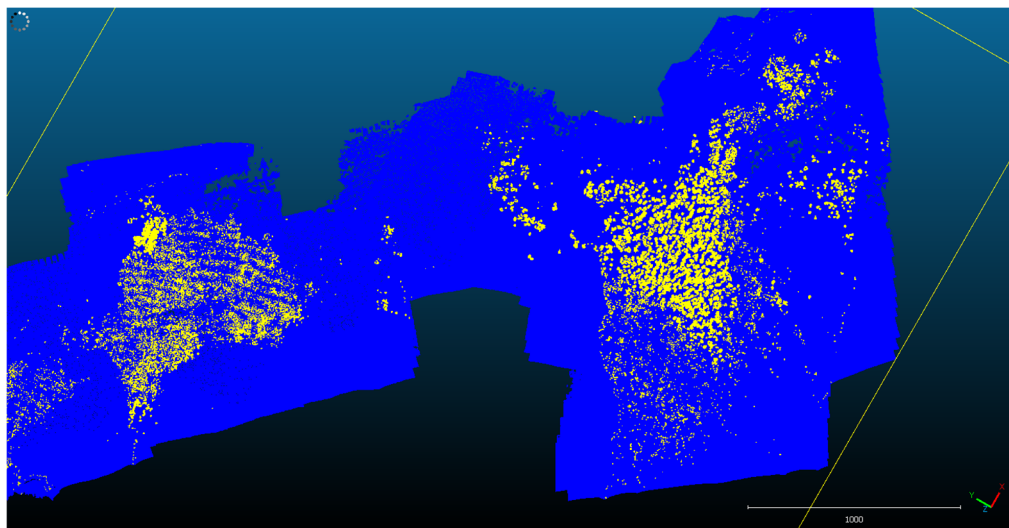


Рис. 4. Классифицированное облако точек острова Гуадалупе в Мексике

Обсуждение

Сравнение автоматической и ручной классификации данных представляет значительный интерес для исследования, поскольку ручная классификация, вы-

полняемая экспертами в предметной области, традиционно рассматривается как эталонный метод, обеспечивающий высокую валидность и надежность результатов. Ручная классификация опирается на когнитивные способности человека, позволяющие учитывать контекст, нюансы и многозначность данных. Однако ее ключевые ограничения – трудоемкость, временные затраты и невозможность масштабирования на большие массивы данных делают ее неприменимой в условиях современных требований к обработке информации. Важным аспектом сравнения является оценка согласованности результатов. Ручная классификация, несмотря на экспертный статус, может демонстрировать вариативность из-за субъективности оценок, тогда как автоматические системы обеспечивают единообразие, но лишь в рамках заложенных в них параметров. Для минимизации этих ограничений актуальным становится использование гибридных подходов, где автоматизация дополняется валидацией экспертов, а ручная разметка оптимизируется за счет предобработки алгоритмами. Таким образом, сопоставление методов подчеркивает не конкуренцию, а комплементарность.

Заключение

Результаты исследования демонстрируют высокую точность алгоритма CANUPO при классификации облаков точек. Плагин позволяет эффективно анализировать и выявлять закономерности в неструктурированных наборах данных большого объема, что особенно актуально для задач обработки природных ландшафтов. Существенным ограничением метода является то, что он учитывает только геометрические параметры, игнорируя информацию об интенсивности отражения и цветовых характеристиках RGB.

Практическая значимость CANUPO подтверждается его успешным применением для сегментации сложных природных объектов на примере острова Гуадалупе. Данные, полученные с помощью алгоритма, можно использовать для кадастрового учета и мониторинга объектов. Однако для многоклассовой классификации необходима разработка иерархических схем, что увеличивает вычислительную нагрузку. Оптимизация параметров многомасштабного анализа (Min/Max scale, Step) и сбалансированность обучающих выборок остаются критическими факторами для повышения точности модели.

Таким образом, CANUPO представляет собой мощный инструмент для задач бинарной геометрической классификации, чья эффективность может быть усилена через комбинацию с другими методами и адаптацию под специфические условия применения. Результаты исследования подчеркивают необходимость развития гибридных решений, объединяющих преимущества автоматизации и экспертного анализа, что особенно важно в условиях роста объемов 3D-данных и требований к их интерпретации.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rohith M. Automatic classification of LaDAR data // Laboratoriet for Digital Arkeologi DARK Lab. – 2023. – №1. – URL: <https://www.darklab.lu.se/swedigarch-tutorials/tutorials/automatic-classification-of-lidar-data/> (дата обращения: 06.05.2025).
2. Саута О. И. Автоматический подсчет и классификация деревьев с использованием лидарных данных для анализа лесных массивов / О. И. Саута, О. М. Филонов, П. А. Окин, Н. В. Наймитенко // Флагман Науки. – 2025. - № 1(24). – С. 408–411.
3. Дьяченко Р. А. Разработка методики классификации точек лазерного отражения на основе программного обеспечения Bentley Microstation / Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, Д. А. Беспятчук, С. В. Самарин, А. В. Андрющенко // Научные труды КубГТУ. – 2023. - № 1. – С. 28–35.
4. Soilan M. Pointnet for the automatic classification of aerial point clouds / M. Soilan, R. Lindenbergh, B. Riveiro, A. Sanchez-Rodriguez // ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. - 2019. № 2(5). – P. 445.
5. Weidner L. Classifying rock slope materials in photogrammetric point clouds using robust color and geometric features / L. Weidner, G. Walton, A. Krajnovich // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2021. – № 176. – P. 15–29.
6. Ntuli S. Classification of 3D sonar point clouds derived underwater using machine and deep learning (CANUPO and RandLa-Net) approaches / S. Ntuli, M. Akombelwa, A. Forbes, M. Singh // South African journal of geomatics. – 2024. – № 13(2). P. 269–287.

© Д. А. Гура, Р. А. Дьяченко, Т. А. Тихонов, 2025

С. А. Чигридов¹, Е. Н. Кулик¹✉

Прогнозирование ветровых условий для оценки концентраций загрязнений от стационарных источников

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования пространственно-временной динамики ветрового режима с использованием современных методов анализа данных. Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения преобладающих направлений ветра для решения задач экологического мониторинга, оценки переноса загрязняющих веществ и планирования градостроительной деятельности. Основной целью исследования являлся анализ статистических характеристик ветрового режима на основе обработки массива данных, полученных с метеорологического сервиса. Для решения поставленных задач была разработана программа на языке Python, позволяющая визуализировать данные распределения в виде розы ветров, рассчитывать векторы направления преобладающих воздушных потоков. Методология исследования включала сбор первичных данных о направлении и скорости ветра, их статистическую обработку с расчетом векторных характеристик, а также визуализацию результатов с построением комплексных графиков. В результате проведенного анализа получены количественные оценки преобладающих направлений ветра, определены характерные векторы переноса воздушных масс. Установлено, что предложенная методика позволяет с точностью 83 % определять основные закономерности ветрового режима и распространения загрязнения, что подтверждается сопоставлением с данными инструментальных наблюдений. Результаты исследования важны для оценки состояния окружающей среды, моделирования перемещения вредных примесей, а также полезны при разработке стратегий освоения территорий. Разработанный программный инструмент демонстрирует высокую эффективность при обработке метеорологических данных и может быть адаптирован для решения более широкого круга задач.

Ключевые слова: анализ направления ветра, метеорологические данные, программа для анализа ветра, прогнозирование рассеивания примесей

S. A. Chigridov¹, E. N. Kulik¹✉

Wind conditions' prediction to assess pollution concentrations from stationary origins

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: e.n.kulik@ssga.ru

Abstract. The article presents the results of a study of the spatial and temporal dynamics of the wind regime using modern data analysis methods. The relevance of the work is due to the need to study the prevailing wind directions in order to solve the problems of environmental monitoring, assessment of pollutant transport and planning of urban development activities. The main purpose of the study was to analyze the statistical characteristics of the wind regime based on the processing of the data array obtained from the meteorological service. To solve these tasks, a Python program was developed that allows visualizing the distribution data in the form of a wind rose and calculating the direction vectors of the prevailing air currents. The research methodology included the collection of primary data on the direction and speed of the wind, their statistical processing with the calculation

of vector characteristics, as well as visualization of the results with the construction of complex graphs. As a result of the analysis, quantitative estimates of the prevailing wind directions were obtained, and characteristic vectors of air mass transfer were determined. It has been established that the proposed technique allows to determine the basic patterns of the wind regime and the spread of pollution with an accuracy of 83 %, which is confirmed by comparison with the data of instrumental observations. The results of the research are important for assessing the state of the environment, modeling the movement of harmful impurities, and are also useful in proposal strategies for the territorial development. The created software tool demonstrates high efficiency in processing meteorological data and can be adapted to solve a wider range of tasks.

Keywords: wind direction analysis, meteorological data, wind analysis software, prediction of impurity dispersion

Введение

Одним из элементов разрабатываемой информационной системы поддержки принятия решений (ППР) по развитию пригородных территорий является модуль пространственного моделирования распространения загрязнений и расчета концентрации загрязняющих веществ. Определение областей, подверженных загрязнению, выполняется с помощью модели Паскуилла-Гиффорда [1], в которой используются данные об объемах выбросов и координаты вектора направления ветра. Прогнозировать объемы выбросов не представляется возможным, так как множество факторов влияет на них (увеличение потребителей, температура окружающей среды, нагрузка промышленных производств и т.п.). В связи с этим было принято решение о прогнозировании ветровых условий, чтобы оценивать территории, которые потенциально подвержены загрязнению.

Методы и материалы

Для формирования прогнозного набора данных необходимо обработать и проанализировать данные за предыдущие годы наблюдения ветровой истории. Исходные данные о направлении ветра по месяцам были собраны за период с 2000 по 2023 гг. с сервиса GISMETEO [2]. По каждому из восьми основных направлений суммировалось количество дней в месяце, когда наблюдалось соответствующее направление ветра. Полученные данные были систематизированы в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Данные о направлении ветра за июль месяц

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
В	1	1	4	4	1	4	3	5	0	5	2
СВ	2	4	4	3	4	3	5	8	5	4	3
С	7	4	5	8	8	4	5	3	7	4	10
СЗ	6	1	6	6	5	6	0	1	2	1	3
З	3	10	3	2	2	1	3	0	6	3	1
ЮЗ	3	2	5	1	3	3	7	3	3	3	5
Ю	4	7	1	5	2	8	7	10	7	8	6
ЮВ	2	1	2	2	4	0	1	1	0	2	0

Критерии выделения климатически значимых ветровых режимов основаны на статистическом анализе 24-летнего периода наблюдений. Для каждого месяца и соответствующего направления были рассчитаны медиана (μ) и стандартное отклонение (σ), формирующие диапазон изменчивости ($\mu \pm \sigma$). Данный подход позволит учесть различную природную вариабельность и выделить статистически значимые аномалии (табл. 2).

Таблица 2

Рассчитанные значения диапазона для июля месяца

	μ	σ	$\mu - \sigma$	$\mu + \sigma$
С	4,74	4,69	0,05	9,42
СВ	3,70	3,14	0,55	6,84
В	4,48	4,86	0,00	9,34
ЮВ	4,35	4,09	0,26	8,44
Ю	3,91	4,15	0,00	8,06
ЮЗ	3,30	2,60	0,71	5,90
З	4,04	4,39	0,00	8,43
СЗ	1,61	1,75	0,00	3,36

В процессе расчета $\mu - \sigma$ получались отрицательные значения. Такая ситуация возникает в случае, когда стандартное отклонение больше или сопоставимо с медианным значением ($\sigma \geq \mu$). Так как количество дней (N) находится в диапазоне $0 - N_{max}$, все отрицательные значения были приравнены нулю.

Для получения координат векторов направления ветра для рассчитанных значений были построены розы ветров, рассчитаны их центры масс и построены векторы преобладающего направления ветра (рис. 2, 3). Использовалась усовершенствованная версия программы для построения роз ветров [3]. В отличие от предыдущей версии программы, обновленная:

- позволяет загружать исходные данные не только вручную, но и из текстовых CSV-файлов;
- имеет возможность строить n-роз ветров на одном графике;
- инвертирует и сохраняет координаты вектора направления ветра в txt-файл (необходимые переменные для расчета модели);
- строит график с векторами направления ветра (для визуальной оценки);
- рассчитывает угол разброса загрязняющих веществ и строит границы области распространения загрязнения;
- сохраняет график с розами ветров, график с векторами и таблицу с рассчитанными данными в PDF-файл (отчетный файл).

При проведении исследования [2] эмпирически была выявлена зависимость ширины области загрязнения от длины вектора направления ветра. Чем стабильнее был ветер, тем больше евклидово расстояние вектора, тем уже область за-

грязнения и наоборот. Следовательно, не смотря на отклонение контрольной области от прогнозных, они могут и/или будут пересекаться.

Для проверки пересечения контрольной области загрязнения с рассчитанными, в программу была интегрирована формула:

$$L = \frac{1000 \times D + 180,0087}{0,342 \times D^3 + 4,756 \times D^2 + 6,3228 \times D + 1}, \tag{1}$$

где L – угол распространения загрязнения; D – евклидово расстояние, рассчитанное по координатам центра масс

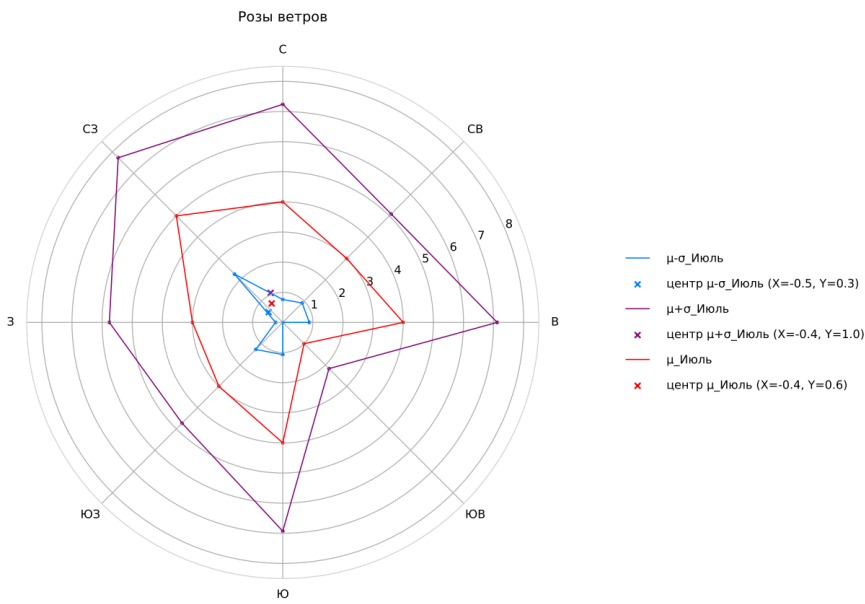


Рис. 2. Розы ветров и их центры масс по рассчитанным значениям для июля месяца

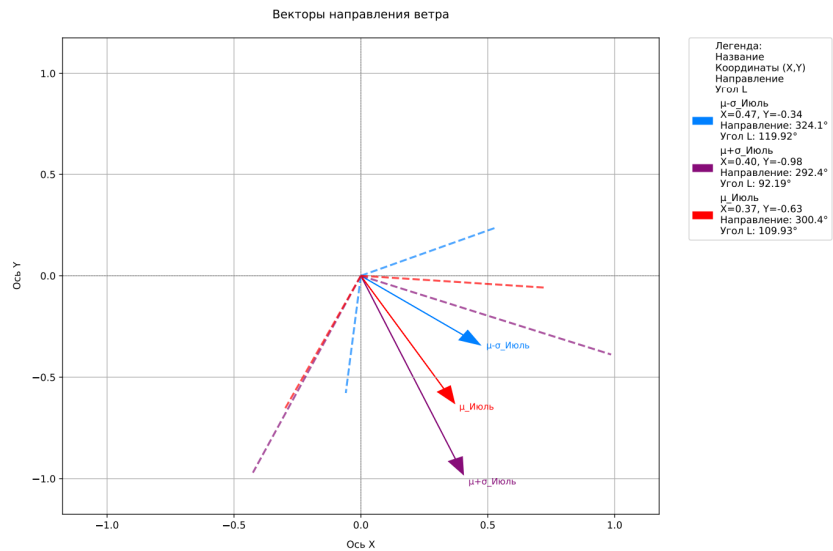


Рис. 3. Векторы направления ветра по рассчитанным значениям для июля месяца

В табл. 3 представлены рассчитанные и инвертированные данные для июля месяца. Угол направления считается от восточного направления против часовой стрелки.

Таблица 3

Рассчитанные и инвертированные данные за июль месяц

Название розы ветров	Рассчитанные координаты		Угол направления	Инвертированные координаты		Угол направления инвертированный
	X	Y		X	Y	
$\mu+\sigma$	-0,47	0,34	144,1	0,47	-0,34	324,1
μ	-0,40	0,98	112,4	0,40	-0,98	292,4
$\mu-\sigma$	-0,37	0,63	120,4	0,37	-0,63	300,4

Расчетные данные будут соответствовать действительности в случае, если вектор контрольного направления ветра и угловой «коридор» его евклидова расстояния будет располагаться между прогнозными значениями направления и угла евклидова расстояния для значения « $\mu-\sigma$ » и « $\mu+\sigma$ ». В иных случаях необходимо оценивать степень отклонения по обоим значениям.

Результаты

Для оценки точности прогнозирования были собраны данные за 2024 год и построены розы ветров (рис. 4) и векторы направления ветра (рис. 5).

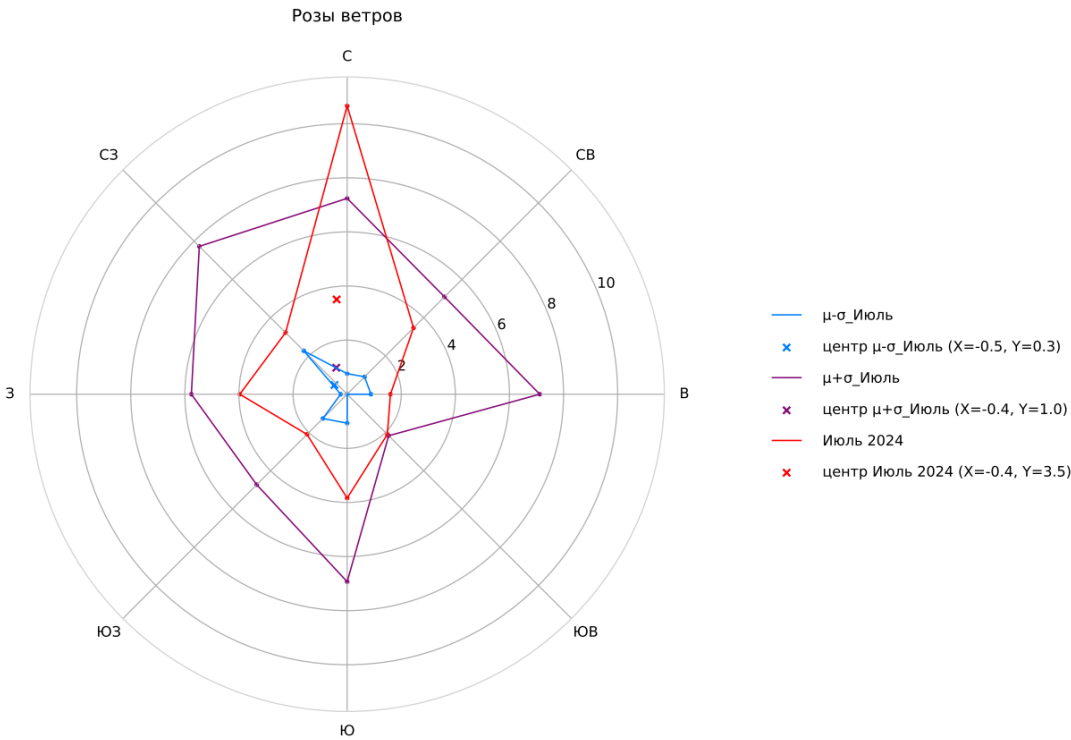


Рис. 4. Розы ветров по рассчитанным и контрольным данным для июля месяца

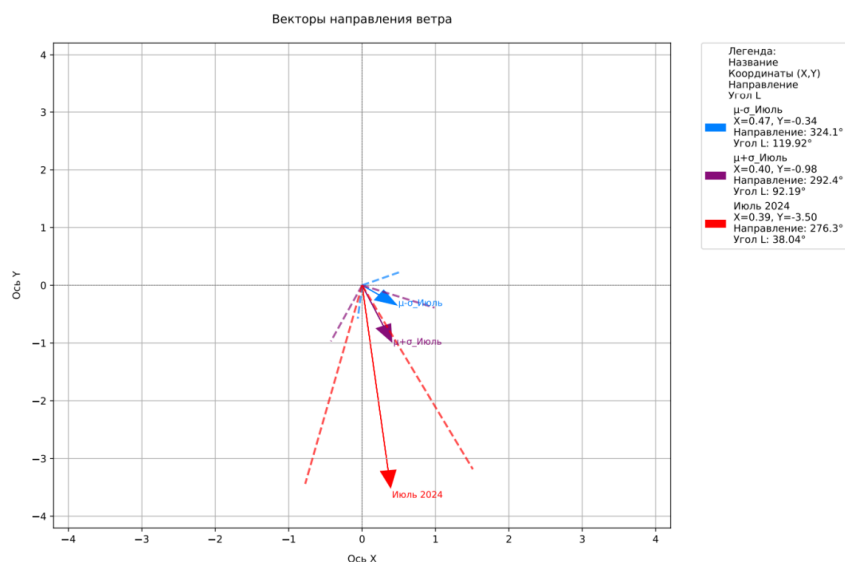


Рис. 5. Векторы направления ветра по рассчитанным и контрольным данным для июля месяца

Из рис. 5 видно, что контрольное направление вектора не входит в диапазон рассчитанных значений, однако контрольная область распространения загрязнения находится в диапазоне рассчитанных.

Обсуждение

Для проверки точности прогнозирования были построены розы ветров и векторы направления для остальных месяцев и сформирована сводная таблица (табл. 4) в которой:

- мес. – месяц;
- L_{get} – вхождение значения угла вектора в рассчитанный диапазон (да/нет);
- L_{grad} – отклонение угла вектора направления ветра от диапазона (градусы);
- $Area_{get}$ – вхождение значения области распространения загрязнения в рассчитанный диапазон (да/нет);
- Dev_{per} – процент отклонения контрольной области загрязнения от прогнозных данных (%).

Таблица 4

Оценка точности прогнозирования

мес.	L_{get}	L_{grad}	$Area_{get}$	Dev_{per}
1	нет	6,2	нет	18,4
2	нет	11,5	нет	9,6
3	да	0	да	0,0
4	нет	15,1	нет	26,2
5	да	0	да	0,0

6	да	0	да	0,0
7	нет	16,1	да	0,0
8	нет	76,4	нет	33,5
9	нет	57,9	нет	59,2
10	нет	11,2	нет	39,1
11	нет	7,9	да	0,0
12	нет	4,2	да	0,0

Результат прогнозирования:

- 50 % – допустимое отклонение вектора направления ветра и полное совпадение контрольной области загрязнения с рассчитанными диапазонами;
- 33 % – допустимое отклонение вектора направления и области загрязнения контрольных значений от рассчитанных диапазонов;
- 17 % – критическое отклонение вектора направления; критическое смещение контрольной области.

Итоговая точность прогнозирования пары «направления ветра/область загрязнения» с допущением отклонения областей распространения загрязнения в пределах 0–40 % от рассчитанного диапазона и при отклонении угла направления ветра в пределах 0–16 градусов, составляет – 83 %.

Заключение

Проведенное исследование позволило получить готовый инструмент для автоматизированного анализа и прогнозирования ветрового режима и, следовательно, зависимо от него распространения загрязнения от точечных источников (ТЭЦ). Основные результаты показали, что используемый подход обработки данных позволяет прогнозировать направление загрязнения и область его распространения с точностью 83 %.

Перспективой дальнейших исследований является совершенствование точности прогнозов за счет внедрения нейронных сетей и применения модели ARIMA [4, 5], а также увеличения объема статистической выборки. Разработанный подход применим к различным регионам, что делает его универсальным в общей системе поддержки принятия решений при проектировании развития пригородных территорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Atmospheric Dispersion Modeling. [Electronic resource] // University of Washington. – URL: <https://faculty.washington.edu/markbenj/CEE357/CEE%20357%20air%20dispersion%20models.pdf>
2. Чигридов С. А., Кулик Е. Н. Геопространственное моделирование при оценке территорий для жилого строительства // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 2. – С. 135–143. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-135-143.
3. Дневник погоды [Электронный ресурс] // ГИСМЕТЕО. – URL: <http://www.gismeteo.ru/diary/4690/>

4. Модель Python | ARIMA для прогнозирования временных рядов [Электронный ресурс] // GeeksforGeeks. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/python-arima-model-for-time-series-forecasting/>
5. Орлов Д. В. Разработка и исследование методов предиктивного управления мощностью ветроэлектростанций в электроэнергетических системах : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет». URL: https://www.nstu.ru/files/dissertations/dissertaciya_orlov_168595711145.pdf

© С. А. Чигридов, Е. Н. Кулик, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1. П. В. Воронина. Динамика снежного покрова на территории Новосибирской области по спутниковым данным.....	3
2. Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, С. А. Ярутин, П. Е. Чечель. Алгоритмическое обеспечение эффективного сканирования территорий: построение оптимальных маршрутов.....	11
3. С. А. Карин, В. В. Лобовко. Разработка алгоритма управления очередью обработки данных дистанционного зондирования Земли на основе ее оптимизации по критерию приоритета поступающих задач.....	17
4. С. А. Карин, В. В. Лобовко. Разработка алгоритма формирования сценариев обработки данных дистанционного зондирования Земли на основе учета параметров текущего информационного потока.....	25
5. А. Н. Мазяр, Е. А. Мамаш, И. А. Пестунов. Многолетний анализ температуры поверхностного слоя озера Байкал по данным спутникового мониторинга.....	33
6. И. В. Овсянников, С. А. Рылов. Использование камер наружного видеонаблюдения для мониторинга осадков.....	40
7. С. А. Рылов, А. С. Лапушинский. Геоинформационная система для автоматизированного мониторинга площадей водных объектов.....	46
8. М. Е. Сиденко, С. А. Рылов. Влияние спектральных характеристик и методов предобработки спутниковых снимков при выделении водной поверхности.....	51
9. М. А. Сквазников, Д. Л. Колыгин. Космический мониторинг объектов наземной транспортной инфраструктуры в зоне чрезвычайной ситуации.....	57
10. С. К. Фарбер, Н. С. Кузьмик, А. А. Мартынов. Подбор местоположений пробных площадей на исследование пирогенных сосняков.....	64
11. И. В. Боровко, В. Н. Крупчатников. Численное исследование обрушения планетарных волн и их связь с атмосферными блокировками.....	69
12. А. В. Гаврилов, В. В. Малахова. Разработка карты шельфовой криолитозоны с использованием численного моделирования: значимость геологических факторов.....	76
13. Н. Н. Завалишин. Анализ и долгосрочный прогноз динамики расходов воды по створу Обь – Барнаул с применением модели аддитивных гармоник.....	82
14. А. О. Крекнин, М. С. Хайретдинов, О. А. Копылова. Адаптивная квадратурная фильтрация транспортных колебаний в задачах геолокации.....	90
15. А. А. Михайлов, Х. Х. Имомназаров, И. К. Искандаров, И. Н. Умаров. Исследование влияния пространственного расположения эпицентров очагов землетрясений и геологического строения среды на характер распространения сейсмических волн.....	98

16. С. В. Михайлюта, А. А. Леженин. Проветриваемость мест размещения постов мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на территории г. Красноярска.....	106
17. А. В. Михеева. Об особенностях изменения геодинамической обстановки до и после Алтайского землетрясения.....	112
18. А. М. Осипова, А. А. Якименко. Оценка влияния погодных условий на погрешность локализации акустического источника.....	120
19. М. В. Платонова, В. Д. Котлер, Е. Г. Климова. Оценка приземной концентрации и эмиссии метана с поверхности Земли на основе применения алгоритма ансамблевого фильтра Калмана.....	129
20. В. Ф. Рапута, М. А. Запевалов, Т. В. Ярославцева, А. А. Леженин, В. А. Сурнин, А. О. Корунев. Особенности распределения полициклических ароматических углеводородов по территории г. Красноярска.....	134
21. Р. В. Романовский. Нарботка опыта в организации полевых работ для целей двумерного моделирования речной гидравлики р. Углегорка (о. Сахалин).....	141
22. В. В. Сказка, А. С. Сердюков, А. В. Азаров. О построении целевых функционалов с использованием преобразования Стоквелла при решении обратных задач геофизики.	149
23. А. Ю. Танакова, И. Е. Васильева. Динамика поступления консервативных примесей с водосборов малых рек урбанизированных территорий (на примере реки Барнаулки)	156
24. А. С. Хорунженко, Ан. Г. Марчук. Расчёт цунами в больших областях методом декомпозиции сетки.....	163
25. А. Т. Байшуаков, Е. Н. Кулик. Применение технологий искусственного интеллекта при выявлении болезней сельскохозяйственных посевов по материалам съемки.....	170
26. А. Л. Верхотуров, А. С. Степанов. Возможности спутниковой радиолокации для мониторинга пахотных земель	177
27. Д. В. Долгополов, Т. И. Кузнецов, А. Л. Федотов. Применение данных дистанционного зондирования Земли для информационного обеспечения геотехнического мониторинга магистральных трубопроводов.....	182
28. Т. И. Кузнецов, Д. В. Долгополов, А. И. Барышев. Мониторинг трасс магистральных трубопроводов с использованием средств воздушного лазерного сканирования и дифференциальной подсистемы ГНСС.....	189
29. Т. О. Перемитина, И. Г. Яценко. Геоэкологический мониторинг растительности арктических углеводородных территорий с использованием спутниковых данных	197
30. А. С. Степанов, Е. А. Фомина, А. А. Холодков. Изучение состояния посевов сои юга Дальнего Востока по данным дистанционного и наземного мониторинга.....	205
31. Д. А. Гура, Р. А. Дьяченко, Т. А. Тихонов. Применение алгоритма CANUPO для классификации точек лазерного отражения	210
32. С. А. Чигридов, Е. Н. Кулик. Прогнозирование ветровых условий для оценки концентраций загрязнений от стационарных источников.....	217

CONTENTS

1. P. V. Voronina. Snow cover dynamics on the Novosibirsk region from remote sensing data	3
2. R. A. Dyachenko, D. A. Gura, S. A. Yarutin, P. E. Chechel. Algorithmic support for efficient area scanning: optimal route construction	11
3. S. A. Karin, V. V. Lobovko. Development of an algorithm for managing the queue of remote sensing data processing on the basis of its optimization by the criterion of priority of incoming tasks.....	17
4. S. A. Karin, V. V. Lobovko. Development of an algorithm for the formation of scenarios for processing remote sensing data of the Earth based on taking into account the parameters of the current information flow.....	25
5. A. N. Maziar, E. A. Mamash, I. A. Pestunov. Multiyear analysis of lake Baikal surface layer temperature based on satellite monitoring data.....	33
6. I. V. Ovsyannikov, S. A. Rylov. Using outdoor CCTV cameras for rainfall monitoring	40
7. S. A. Rylov, A. S. Lapushinskii. Geoinformation system for automated monitoring of water body surface areas	46
8. M. E. Sidenko, S. A. Rylov. The influence of spectral characteristics and preprocessing methods on water segmentation on satellite images	51
9. M. A. Skvaznikov, D. L. Kolygin. Space monitoring of ground transportation infrastructure objects in emergency zones.....	57
10. S. K. Farber, N. S. Kuzmik, A. A. Martynov. Selection of locations of trial areas for the study of pyrogenic pine forests	64
11. I. V. Borovko, V. N. Krupchatnikov. Numerical study of planetary waves breaking and their relation to the atmospheric blockings	69
12. A. V. Gavrilov, V. V. Malakhova. The importance of geological factors in creating a map of the shelf cryolithozone using numerical modeling	76
13. N. N. Zavalishin. Analysis and long-term forecast of water discharge dynamics in the Ob-Barnaul station using the additive harmonics model.....	82
14. A. O. Kreknin, M. S. Khayretdinov, O. A. Kopylova. Adaptive quadrature filtering of transport vibrations in geolocation tasks	90
15. A. A. Mikhailov, Kh. Kh. Imomnazarov, I. K. Iskandarov, I. N. Umarov. -Investigate influence of a spatial arrangement of epicenters of the centers of earthquakes and geological structure of the media on the nature of distribution of seismic waves	98
16. S. V. Mikhailuta, A. A. Lezhenin. Krasnoyarsk air pollution monitoring points, ventilation by innerurban winds	106
17. A. V. Mikheeva. On the features of change in the geodynamic setting before and after the 2003 Altai earthquake	112
18. A. M. Osipova, A. A. Yakimenko. Assessment of the influence of weather conditions on the localization error of an acoustic source	120

19. M. V. Platonova, V. D. Kotler, E. G. Klimova. Estimation of surface methane concentration and emission using ensemble Kalman filter algorithm	129
20. V. F. Raputa, M. A. Zapevalov, T. V. Yaroslavtva, A. A. Lezhenin, V. A. Surnin, A. O. Korunov. Features of the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the territory of Krasnoyarsk	134
21. R. V. Romanovskiy. Gaining experience in organizing field work for two-dimensional modeling of river hydraulics in the Ulegorka river (Sakhalin Island)	141
22. V. V. Skazka, A. S. Serdyukov, A. V. Azarov. On constructing objective functionals using the Stockwell transform when solving inverse problems of geophysics.	149
23. A. Yu. Tanakova, I. E. Vasilyeva. The Dynamics of conservative impurities inflow from the watershed area of small rivers in urbanized territories (case study of the Barnaulka River)	156
24. A. S. Khorunzhenko, An. G. Marchuk. Calculation of tsunami wave propagation using domain decomposition.....	163
25. A. T. Bayshuakov, E. N. Kulik. Application of artificial intelligence in identifying diseases of agricultural crops based on survey data	170
26. A. L. Verkhoturov, A. S. Stepanov. SAR data capability for crop monitoring	177
27. D. V. Dolgoplov, T. I. Kuznetsov, A. L. Fedotov. Application of remote sensing data for information support of geotechnical monitoring of main pipelines.....	182
28. T. I. Kuznetsov, D. V. Dolgoplov, A. I. Baryshev. Monitoring of main pipeline routes using airborne laser scanning and the GNSS differential subsystem	189
29. T. O. Peremitina, I. G. Yashchenko. Geoecological monitoring of vegetation in arctic hydrocarbon territories using satellite data	197
30. A. S. Stepanov, E. A. Fomina, A. A. Kholodkov. Study of soybean crops in the south of The Far East Based on remote and ground monitoring data.....	205
31. D. A. Gura, R. A. Dyachenko, T. A. Tikhonov. Application of CANUPO algorithm to classify laser reflection points	210
32. S. A. Chigrinov, E. N. Kulik. Wind conditions' prediction to assess pollution concentrations from stationary origins	217

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXI Международный научный конгресс

Сборник материалов в 8 т.

Т. 4

Международная научная конференция

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

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Я. А. Лесных*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 20.08.2025. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 13,31. Тираж 34 экз. Заказ 87.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.