



УДК 528.854.4 (282.256.341)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.57.3>

Районирование Баргузинского залива озера Байкал с применением данных Landsat-8,9: пилотное исследование

Ф. М. Андреев, Е. Н. Сутырина, А. О. Черкасова, М. А. Шевелев*

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Статья посвящена авторскому подходу к выделению лимнических районов, реализованному на основе анализа спутниковых данных и ГИС-технологий. Объектом исследования послужил Баргузинский залив – крупнейший и наиболее глубоководный залив озера Байкал, подверженный влиянию комплекса антропогенных факторов. В ходе исследования отобраны малооблачные снимки Landsat-8,9 за бездоставный период в 2013–2025 гг. в видимом, ближнем, коротковолновом и тепловом инфракрасных диапазонах. Для обработки снимков использовалась свободно распространяемая геоинформационная система (ГИС) QGIS и модули Orfeo ToolBox. На основе собранных данных Landsat-8,9 созданы актуальные маски «вода – суша» и определены отдельные экологически значимые параметры водной среды, такие как температура поверхности воды и некоторые спектральные индексы мутности: *FAI* (Floating Algae Index) и *Harma*. Для выполнения районирования также привлекалась батиметрическая информация с разрешением 15 угловых секунд. Акватория Баргузинского залива была поделена на сегменты, в пределах каждого из них осуществлялась оценка статистических характеристик положения и разброса значений температуры поверхности воды, индексов мутности и распределения глубин с применением процедур зональной статистики. Сегменты объединялись в лимнические районы, основываясь на результатах анализа зональной статистики и характера связи значений спектральных индексов мутности с температурой и глубиной. Для каждого из установленных районов проанализирован характер взвесей. Согласно диапазонам значений использованных спектральных индексов установлены районы, в которых мутность, вероятно, обусловлена «цветением» воды, а также районы, в которых преобладают неорганические взвеси, связанные с поступлением и перераспределением речных наносов и наносов, обусловленных абразией берегов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, температура поверхности воды, спектральные индексы мутности, Landsat, QGIS.

Для цитирования: Районирование Баргузинского залива озера Байкал с применением данных Landsat-8,9: пилотное исследование / Ф. М. Андреев, Е. Н. Сутырина, А. О. Черкасова, М. А. Шевелев // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2026. Т. 57. С. 3–14. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.57.3>

Original article

Zoning of Barguzin Bay of Lake Baikal Using Landsat-8,9 Data: Pilot Study

F. M. Andreyev, E. N. Sutyryna, A. O. Cherkasova, M. A. Shevelev*

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

© Андреев Ф. М., Сутырина Е. Н., Черкасова А. О., Шевелев М. А., 2026

* Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

Abstract. This article is devoted to the delineation of limnic zones based on the application of satellite data. The object of this study was the Barguzin Bay, which is the largest and deepest bay of Lake Baikal and is subject to the influence of a number of anthropogenic factors. During the study, partly cloudy Landsat-8,9 images for the ice-free period in 2013–2025 in the visible, near, shortwave, and thermal infrared bands were selected. For image processing, the freely distributed geographic information system QGIS and Orfeo ToolBox modules were used. Based on the collected Landsat-8,9 data, up-to-date water-land masks were created and separate environmentally significant parameters of the aquatic environment, such as surface water temperature and some spectral turbidity indices: *FAI* (Floating Algae Index) and *Harma* were estimated. For zoning, bathymetric information with a resolution of 15 arc seconds was also used. The water area of Barguzin Bay was divided into segments, for each segment an assessment of the statistical parameters of position and dispersion of temperature characteristics, turbidity indices, and depth distribution was performed. Based on the above data segments were then combined into limnic zones through the analysis of the nature of the relationship between the values of spectral turbidity indices with temperature and depth. For each of the established zones, the genesis of suspended sediments was analyzed. Zones where turbidity is caused by water “blooming”, were identified as well as zones where inorganic suspended sediments predominate, associated with the inflow and redistribution of river sediments and sediments caused by shore abrasion.

Keywords: remote sensing, water surface temperature, turbidity indices, Landsat, QGIS.

For citation: Andreyev F.M., Sutyryna E.N., Cherkasova A.O., Shevelev M.A. Zoning of Barguzin Bay of Lake Baikal Using Landsat-8,9 Data: Pilot Study. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2026, vol. 57, pp. 3-14. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.57.3> (in Russian)

Введение

В качестве объекта исследования был выбран Баргузинский залив, который является самым крупным и глубоким заливом оз. Байкал и расположен на востоке центральной части озера (рис. 1). На севере залива часть его акватории входит в состав Забайкальского национального парка¹. Баргузинский залив имеет важное рыбохозяйственное значение и является местом нагула молоди омуля и акваторией формирования нерестовых косяков [Коновалова, Цырендылыкова, 2022].

Залив является одним из центров притяжения для туризма и рекреации. Значительное увеличение потока туристов ведет к интенсификации поступления загрязняющих веществ в водную экосистему [Human ... , 2021; Evaluation ... , 2024; Anthropogenic ... , 2021]. Для акватории Баргузинского залива зафиксировано как повышенное содержание соединений азота, так и аномально высокое содержание фосфатов, достигающее 0,94 мг/дм³ [О химическом ... , 2020]. Биогенные элементы поступают в Байкал как с водами притоков, так и за счет диффузных стоков – непосредственно с побережий. Вследствие этого вблизи населенных пунктов и туристических комплексов отмечается аномальное развитие водорослей, в том числе и инвазивных видов. При этом негативное влияние антропогенных объектов может распространяться и на значительное расстояние от источников загрязнения [Воложжина, 2010]. Согласно исследованию [Комплексные ... , 2022], для р. Баргузин – основного притока залива – реализация потенциала самоочищения лимитируется поступлением в водоток минеральных веществ из засо-

¹ Забайкальский национальный парк. URL: <https://zapovednoe-podlemorye.ru/save/park/> (дата обращения: 24.04.2026).

ленных ландшафтов впадины байкальского типа, заполненной неоген-четвертичными рыхлыми, хорошо размываемыми породами [Ильичёва, Павлов, 2022]. Дополнительно к аномальному «цветению» воды могут приводить и тенденции к росту температуры поверхности воды в озере, показанные в работах [Eppelbaum, Sutyryna, Andreyev, 2026].

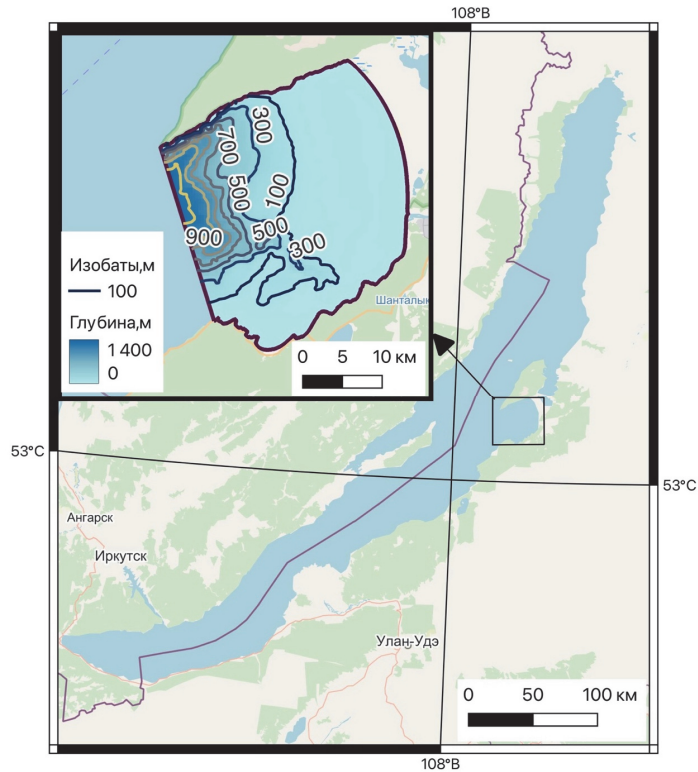


Рис. 1. Расположение Баргузинского залива (см. врезку) оз. Байкал

Неконтролируемое развитие туризма ведет к вытаптыванию и деградации растительности, способствует разрушению мест обитания эндемичных видов и содействует усилению абразии берегов, что может приводить к локальному увеличению мутности воды вследствие поступления неорганических взвесей. Еще один фактор поступления взвешенных наносов в залив – со стоком рек, однако ряд исследований показывает снижение поступления речных наносов вследствие климатических изменений и/или в результате техногенного преобразования русел и долин рек [Типизация ... , 2020; Потемкина, Потемкин, 2023].

Актуальность настоящего исследования обусловлена показанными выше климатическими изменениями и возрастающим антропогенным воздействием на экосистему оз. Байкал [Human ... , 2021; Sinyukovich, Chernyshov, 2019] в целом и на Баргузинский залив в частности. Это ведет к необходимо-

сти экологического мониторинга состояния указанных акваторий [Makarov, Aslamov, Gnatovsky, 2021]. С учетом размеров Баргузинского залива в 772 км² методы наблюдений за водными объектами, основанные только на дискретных измерениях, хоть и крайне важны для валидации спутниковой информации, но не обеспечивают необходимой пространственной и временной репрезентативности для комплексной оценки состояния водной среды в пределах всей исследуемой акватории. Возникает потребность в разработке и внедрении современных методов анализа данных дистанционного зондирования Земли средствами ГИС-технологий. Такие методы позволяют получать объективную картину пространственного распределения экологически значимых параметров водной среды на всей акватории залива. Сказанное выше обуславливает цель настоящего исследования – разработать авторский подход к районированию акватории Баргузинского залива на основе комплексного анализа мультиспектральных спутниковых данных Landsat-8,9 и батиметрической информации средствами ГИС.

Материалы и методы исследования

В ходе пилотного исследования отобраны 40 малооблачных снимков Landsat-8,9², охватывающих территорию исследования, за безледоставный период в 2013–2025 гг. в видимом, ближнем, коротковолновом и тепловом инфракрасных диапазонах.

Для оценки пространственно-временного распределения температуры поверхности воды и расчета спектральных индексов мутности использовались научные продукты Landsat Collection 2 Surface Reflectance³ и Surface Temperature⁴. Все загруженные продукты Landsat-8,9 с помощью масштабного коэффициента и смещения переведены из *DN* (digital number) в значения соответствующих физических величин: спектральную отражательную способность – в случае информации в видимом, ближнем и коротковолновом инфракрасных каналах (B_2 , B_3 , B_4 , B_5 , B_6) и в градусы Цельсия – для канала B_{10} .

В работе использовались два спектральных индекса мутности:

– индекс *Harma* – это спектральный водный индекс, разработанный для количественной оценки мутности в водных объектах, предложен финскими исследователями изначально для исследования озер Финляндии и прибрежных вод Балтийского моря [Harma, Vepsalainen, Hannonen, 2001]. Этот индекс позволяет за счет использования спектральной отражательной способности в зеленом, красном и синем каналах реагировать на присутствие в воде взвесей различного генезиса. Благодаря своей устойчивости к эффектам глубины индекс хорошо работает в мелководных и прибрежных зонах. По словам разработчиков, индекс *Harma* имеет тесную связь с натурными данными о мутности воды. Формула для расчета индекса выглядит следующим образом:

² EarthExplorer. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 20.12.2025).

³ Landsat Collection 2 Surface Reflectance. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-reflectance> (дата обращения: 22.03.2026).

⁴ Landsat Collection 2 Surface Temperature. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-temperature> (дата обращения: 22.03.2026).

$$Harma = \frac{B_2}{B_4 + B_3 + B_2}, \quad (1)$$

где B_2 , B_3 , B_4 – спектральная отражательная способность соответственно в голубом (длина волны 0,45–0,51 мкм), зеленом (длина волны 0,53–0,59 мкм) и красном (длина волны 0,64–0,67 мкм) участках спектров;

– индекс *FAI* (Floating Algae Index), предложенный в работе [Hu, 2009], предназначен для детектирования плавающих (дрейфующих) водорослей. Ключевое преимущество данного индекса заключается в его способности корректно идентифицировать пиксели, соответствующие органической взвеси в водной толще. *FAI* менее чувствителен к вариациям условий окружающей среды и параметров съемки, так как в основе метода лежит процедура вычитания базовой линии, которая представляет собой эффективный способ атмосферной коррекции. Данный подход позволяет изолировать спектральный вклад, обусловленный дрейфующими водорослями, от фонового сигнала чистой воды и атмосферных помех, что обеспечивает их надежное детектирование. Адаптировав под характеристики прибора Landsat-8,9 OLI (Operational Land Imager) исходную формулу расчета *FAI*, получаем:

$$FAI = B_5 - \left[B_4 + (B_6 - B_4) \cdot \left(\frac{0,865 - 0,655}{1,61 - 0,655} \right) \right], \quad (2)$$

где B_4 , B_5 , B_6 – спектральная отражательная способность в красном (длина волны 0,64–0,67 мкм), ближнем инфракрасном (длина волны 0,85–0,88 мкм) и коротковолновом инфракрасном (длина волны 1,57–1,67 мкм) участках спектров соответственно; 1,61, 0,865 и 0,655 мкм – центральные значения длин волны коротковолнового, ближнего инфракрасного и красного спектральных каналов прибора.

Совместное использование двух индексов позволяет в рамках пилотного исследования по контрасту их значений в пределах акватории залива более достоверно отличать взвеси органического и неорганического происхождения в разных лимнических районах. Данные Landsat о температуре поверхности, согласно работе [Тренды ... , 2025], по результатам валидации показали незначительным средним сдвигом в 0,14 °C по модулю для условий оз. Байкал, что позволяет обоснованно использовать их в рамках настоящего пилотного исследования.

Для целей районирования, кроме данных Landsat-8,9 об отражательной способности и температурных характеристиках подстилающей поверхности, также привлекалась информация о глубинах/отметках дна исследуемой акватории, полученная из глобальной цифровой модели рельефа с пространственным разрешением 15 угловых секунд (пиксель около 270×460 м для условий исследуемой акватории). Данная модель представляет собой усовершенствованную версию продукта SRTM+ (Shuttle Radar Topography Mission Plus), где «+» в названии указывает на интеграцию батиметрических данных, полученных на основе судовых эхолотных промеров и спутниковых прогнозов глубин [Global ... , 2019]. Распределение глубин в пределах Баргузинского залива по данным SRTM+ представлено на врезке (см. рис. 1).

Для составления маски «вода – суша» использовался разработанный членами авторского коллектива адаптивный алгоритм [Андреев, Сутырина, 2025].

Для обработки снимков использовались средства свободно распространяемой ГИС QGIS и программного пакета Orfeo ToolBox (модули «Создать виртуальный растр», Segmentation, «Создать сетку», «Зональная статистика» и т. д.).

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследования составлены ряды картографических изображений температуры поверхности воды, индексов *FAI* и *Harma*, примеры которых представлены на рис. 2. Например, на востоке залива видно, что в месте впадения р. Баргузин наблюдается область, отображаемая темно-синим цветом с низкими значениями индекса *FAI*, что свидетельствует об отсутствии органических взвесей в указанной области, но в поле индекса *Harma* мы видим в этой области снижение значений, что говорит о присутствии взвесей и при совместном анализе с *FAI* интерпретируется как наличие неорганических взвесей и показывает вынос притоком взвешенных наносов неорганического происхождения и их перераспределение в заливе.

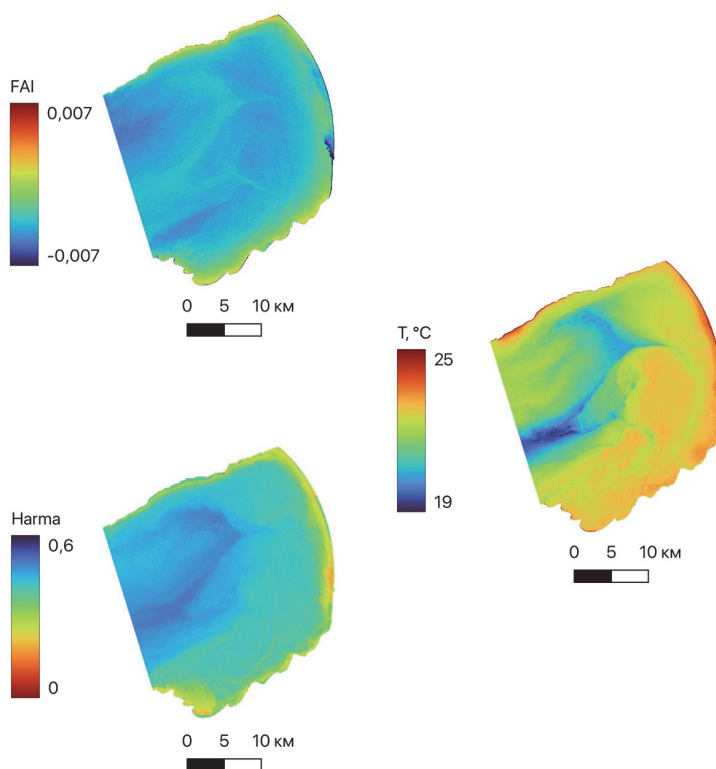


Рис. 2. Распределение спектральных индексов *FAI* (слева наверху), *Harma* (слева внизу) и температуры (справа) на поверхности воды в Баргузинском заливе (на примере 6 августа 2024 г.)

Для каждой из трех характеристик были найдены максимальные и минимальные значения в каждом пикселе и значения размаха величин за безледоставный период в 2013–2025 гг. Был составлен виртуальный растр из четырех каналов: пространственного распределения размаха температуры поверхности воды, индексов *FAI* и *Harma*, а также распределения глубин в пределах исследуемой акватории. Полученный растр был подвергнут процедуре сегментации. В результате акватория Баргузинского залива была поделена на сегменты (рис. 3). Для каждого сегмента были определены статистические характеристики положения (среднее арифметическое) и разброса (минимальные и максимальные значения, размах, стандартное отклонение) температуры поверхности воды, спектральных индексов мутности и распределения глубин.

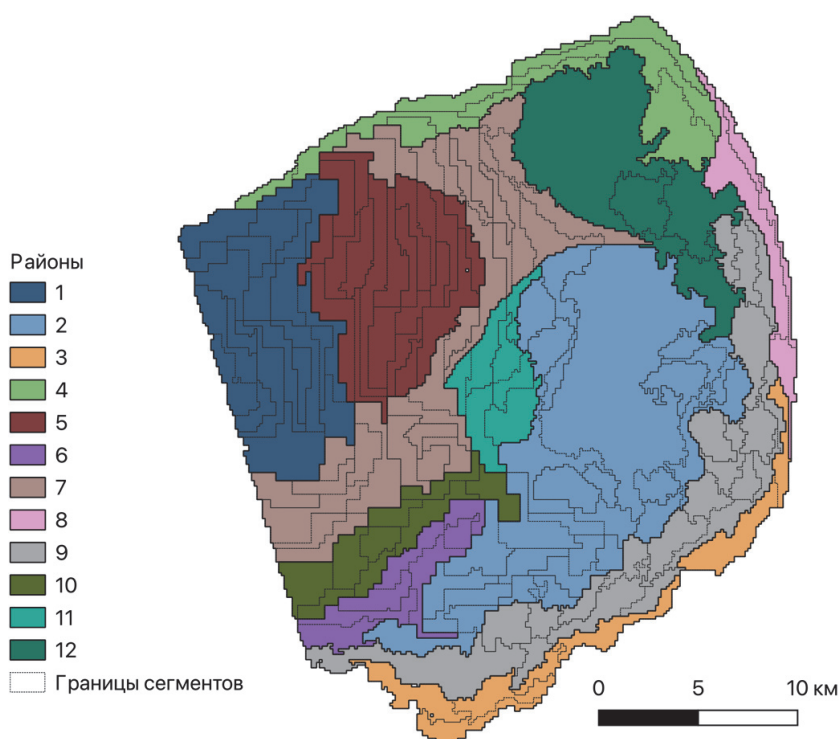


Рис. 3. Пространственное распределение сегментов после их объединения в лимнические районы

Затем сегменты объединялись в лимнические районы посредством анализа пространственного положения сегментов на схеме (см. рис. 3), распределения характеристик мутности, температуры и глубины для каждого сегмента на 3D-диаграммах (рис. 4), построения матриц корреляции параметров водной среды друг с другом и с глубиной акватории.

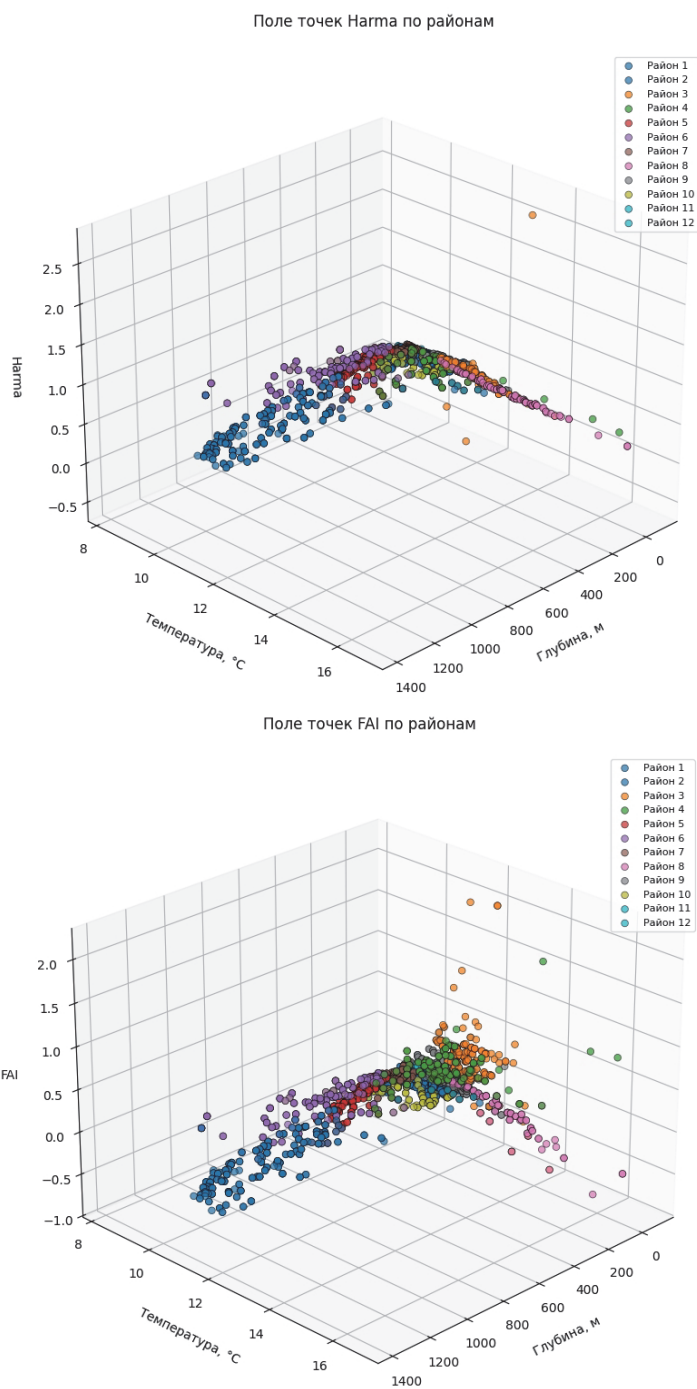


Рис. 4. 3D-диаграммы распределения значений индексов мутности для каждого сегмента в зависимости от температуры и глубины

Установлены районы (например, 3, 4, 7 и 9), в которых по результатам пилотного исследования мутность, по всей вероятности, обусловлена в первую очередь «цветением» воды, а также выявлены районы, в которых преобладают неорганические взвеси (например, 6, 8), связанные с поступлением и перераспределением речных наносов, а также обнаружены районы, в которых в воде присутствуют как органические, так и неорганические взвеси.

Для всех районов (за исключением 3 на юге залива, для которого такая линейная связь отсутствует) обнаруживается наличие обратных линейных связей индекса *Harma* с температурой (от умеренных – для районов 9 и 11, заметных – для районов 2, 4, 6 и 12, тесных – для районов 1, 5, 7 и 10) и менее выраженных прямых зависимостей индекса от глубины. Для индекса *FAI* зависимости с температурой и глубиной носят более явный нелинейный характер, что затрудняет их изучение только на основе корреляционного анализа. Обратная линейная зависимость распределения температуры от глубины (от слабой до тесной) наблюдается в большинстве выделенных районов, но в районе 5 наблюдается аномальная тесная прямая зависимость, которая может быть ассоциирована со сложной системой циркуляции в заливе, в этом же районе наблюдается и обратная заметная связь индекса *Harma*, в отличие от прямой зависимости в других районах, что предположительно может также быть связано с особенностями циркуляции. Для большинства выявленных районов обнаруживается заметная или тесная множественная корреляционная связь одного или двух индексов с распределением температур и глубин.

В ходе пилотного исследования показана потенциальная применимость подхода районирования Баргузинского залива по спутниковым данным с применением средств ГИС и данных Landsat-8,9. Построена предварительная схема деления залива на лимнические районы. Для каждого из установленных районов предварительно проанализирован характер взвесей по генезису, получена информация о тесноте корреляционных связей спектральных индексов мутности с распределением температур и глубин. Обнаруженные связи спектральных индексов с температурными и морфометрическими характеристиками в дальнейшем могут быть использованы при изучении особенностей гидрофизического режима залива и характера распределения гидрооптических характеристик в нем.

Выводы

В дальнейшем планируется на основе анализа спутниковых данных уточнить схему течений в заливе и на ее основе дополнить структуру районов, а также произвести валидацию значений спектральных индексов мутности по подспутниковым данным для уточнения их пороговых значений для условий оз. Байкал. Кроме этого, на последующих этапах исследования предполагается провести более строгий отбор снимков, чтобы избежать выраженного влияния ветрового волнения и других факторов на распределение гидрофизических показателей, отображаемых на снимках.

Список литературы

- Андреев Ф. М., Сутырина Е. Н. Автоматизированное детектирование о. Ярки (оз. Байкал) на основе спектральных индексов NDWI, MNDWI и WRI // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2025. Т. 31, ч. 2. С. 212–220. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2025-2-31-212-220>
- Вологжина С. Ж. Особо охраняемые природные территории побережья озера Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2010. Т. 3, № 2. С. 50–60.
- Ильичёва Е. А., Павлов М. В. Природные факторы формирования устьев притоков Байкала // География и природные ресурсы. 2022. № 5. С. 83–91. <https://doi.org/10.15372/GIPR20220509>
- Комплексные исследования модельных водных объектов бассейна оз. Байкал в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия / Л. Д. Раднаева, В. Г. Ширеторова, И. В. Томберг [и др.] // Экологические проблемы бассейна озера Байкал : сб. материалов Всерос. науч. конф. с междунар. участием : электрон. изд. Улан-Удэ, 2022. С. 88–91. <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0621-3-2022-88-91>
- Коновалова В. В., Цырендылыкова М. Ц. Размерно-возрастная характеристика байкальского омуля в Баргузинском заливе озера Байкал // Природа Внутренней Азии. 2022. № 4 (22). С. 45–49. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2022-4-45-49>
- О химическом составе воды в малых притоках и прибрежной зоне озера Байкал в период экологического кризиса / В. В. Тахтеев, Е. Р. Хадеева, И. О. Еропова, О. Г. Лопатовская // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 3. С. 291–3017. <https://doi.org/10.31857/S0321059620030177>
- Потемкина Т. Г., Потемкина В. Л. Сток наносов притоков озера Байкал: изменения и тенденция // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 43. С. 79–90. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.79>
- Типизация и современное состояние берегов озера Байкал / Е. А. Козырева, А. В. Кадетова, А. А. Рыбченко [и др.] // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 4. С. 453–465. <https://doi.org/10.31857/S0321059620040070>
- Тренды температуры поверхности озера Байкал: многолетний анализ на основе валидированных спутниковых продуктов / Е. А. Мамаш, И. А. Пестунов, В. В. Блинов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22, № 5. С. 306–321. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-5-306-321>
- Anthropogenic transformations in the mouth area of tributaries as factors of negative impact on Lake Baikal / O. Gagarinova, I. Belozertseva, I. Vorobyeva [et al.] // Water. 2021. Vol. 13. Art. N1295. <https://doi.org/10.3390/w13091295>
- Eppelbaum L. V., Sutyryna E., Andreyev F. The long-term variability of the hydrological characteristics of Lake Baikal and its tributaries under climate change and anthropogenic impact // Hydrosystem Restoration Handbook. 2026. Vol. 2: GARC, Part 5. P. 81–101. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-29104-3.00009-4>
- Evaluation of historical data on persistent organic pollutants and heavy metals in Lake Baikal: Implications for accumulation in marine environments / A. Polasko, V. Koutnik, K. Tsai [et al.] // Environmental Research. 2024. Vol. 252. Art. N 119035. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119035>
- Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+ / B. Tozer, D. T. Sandwell, W. H. F. Smith [et al.] // Earth and Space Science. 2019. Vol. 6. Art. N 1847. <https://doi.org/10.1029/2019EA000658>
- Harma P., Vepsäläinen J., Hannonen T. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland // Science of the Total Environment. 2001. Vol. 268, N 1–3. P. 107–121. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00688-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00688-4)
- Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. P. 2118–2129.
- Human impact and ecosystemic health at Lake Baikal / K. Brown, A. Gerber, D. Bedulina, M. Timofeyev // WIREs Water. 2021. Vol. 8. <https://doi.org/10.1002/wat2.1528>
- Makarov M., Aslamov I., Gnatovsky R. environmental monitoring of the littoral zone of Lake Baikal using a network of automatic hydro-meteorological stations: development and trial run // Sensors. 2021. Vol. 21 (22). Art. N 7659. <https://doi.org/10.3390/s21227659>

Sinyukovich V. N., Chernyshov M. S. Water regime of Lake Baikal under conditions of climate change and anthropogenic influence // *Quaternary International*. 2019. Vol. 524. P. 93–101.

References

Andreyev F.M., Sutyryna E.N. Avtomatizirovannoe detektirovanie o. Yarki (oz. Bajkal) na osnove spektralnykh indeksov NDWI, MNDWI i WRI [Automated detection of Yarka island (Baikal Lake) based on NDWI, MNDWI and WRI spectral indices]. *InterGIS*, 2025, vol. 31, part 2, pp. 212–220. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2025-2-31-212-220> (in Russian)

Vologzhina S.Zh. Osobo ohranyaemye prirodnye territorii poberezhniya ozera Bajkal [Protected natural areas of Lake Baikal shore]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of the Irkutsk State University. Earth Sciences Series], 2010, vol. 3, no. 2, pp. 50–60. (in Russian)

Il'icheva E.A., Pavlov M.V. Prirodnye faktory formirovaniya ust'ev pritokov Bajkala [Natural factors in the formation of the mouths of the Baikal tributaries], *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 2022, no. 5, pp. 83–91. <https://doi.org/10.15372/GIPR20220509> (in Russian)

Radnaeva L.D., Shiretorova V.G., Tomberg I.V. et al. Kompleksnyye issledovaniya modelnykh vodnykh objektov bassejna oz. Bajkal v usloviyakh klimaticheskikh izmenenij i antropogennogo vozdejstviya [Integrated studies of model water bodies of the Lake Baikal basin under climate change and anthropogenic impact]. *Ekologicheskiye problemy bassejna ozera Baykal* [Environmental problems of the Lake Baikal basin]. Collection of materials from the All-Russian scientific conference with international participation: electronic publication), Ulan-Ude, 2022, pp. 88–91. <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0621-3-2022-88-91> (in Russian)

Konovalova V.V., Tsyrendylykova M.Ts. Razmerno-vozzrastnaya harakteristika bajkalskogo omulya v Barguzinskom zalive ozera Bajkal [Age-Length Characteristics of the Baikal Omul in the Barguzin Bay of Lake Baikal]. *Priroda Vnutrennej Azii* [Nature of Inner Asia], 2022, vol. 4(22), pp. 45–49. <https://doi.org/10.18101/2542-0623-2022-4-45-49> (in Russian)

Takhteev V.V., Khadeeva E.R., Eropova I.O., Lopatovskaya O.G. O himicheskom sostave vody v mal'yx pritokah i pribrezhnoj zone ozera Bajkal v period ehkologicheskogo krizisa [On the chemical composition of water in small tributaries and the coastal zone of Lake Baikal during the environmental crisis]. *Vodnye resursy* [Water Resources], 2020, vol. 47, no. 3, pp. 291–3017. <https://doi.org/10.31857/S0321059620030177> (in Russian)

Potemkina T.G., Potemkin V.L. Stok nanosov pritokov ozera Bajkal: izmeneniya i tendenciya [Sediment runoff of Lake Baikal tributaries: changes and trends]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of the Irkutsk State University. Earth Sciences Series], 2023, vol. 43, pp. 79–90. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.79> (in Russian)

Kozyreva E.A., Kadetova A.V., Rybchenko A.A. et al. Tipizaciya i sovremennoe sostoyanie beregov ozera Bajkal [Typification and current state of the shores of Lake Baikal]. *Vodnye resursy* [Water Resources], 2020, vol. 47, no. 4, pp. 453–465. <https://doi.org/10.31857/S0321059620040070> (in Russian)

Mamash E.A., Pestunov I.A., Blinov V.V. et al. Trendy temperatury poverhnosti ozera Bajkal: mnogoletnij analiz na osnove validirovannykh sputnikovyykh produktov [Trends in Lake Baikal surface temperature: Long-term analysis based on validated satellite products]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2025, vol. 22, no. 5, pp. 306–321. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-5-306-321> (in Russian)

Gagarinova O., Belozertseva I., Vorobyeva I. et al. Anthropogenic transformations in the mouth area of tributaries as factors of negative impact on Lake Baikal. *Water*, 2021, vol. 13, art. no. 1295. <https://doi.org/10.3390/w13091295>

Eppelbaum L.V., Sutyryna E., Andreyev F. The long-term variability of the hydrological characteristics of Lake Baikal and its tributaries under climate change and anthropogenic impact. *Hydrosystem Restoration Handbook*, 2026, vol. 2: GARC, part 5, pp. 81–101. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-29104-3.00009-4>

Polasko A., Koutnik V., Tsai K. et al. Evaluation of historical data on persistent organic pollutants and heavy metals in Lake Baikal: Implications for accumulation in marine environments. *Environmental Research*, 2024, vol. 252, art. no. 119035. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119035>

Tozer B., Sandwell D.T., Smith W.H.F. et al. Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+. *Earth and Space Science*, 2019, vol. 6, art. no. 1847. <https://doi.org/10.1029/2019EA000658>

Harna P., Vepsäläinen J., Hannonen T. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland, *Science of the Total Environment*, 2001, vol. 268, no. 1-3, pp. 107-121. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00688-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00688-4)

Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, pp. 2118-2129.

Brown K., Gerber A., Bedulina D., Timofeyev M. Human impact and ecosystemic health at Lake Baikal. *WIREs Water*, 2021, vol. 8. <https://doi.org/10.1002/wat2.1528>

Makarov M., Aslamov I., Gnatovsky R. Environmental Monitoring of the Littoral Zone of Lake Baikal Using a Network of Automatic Hydro-Meteorological Stations: Development and Trial Run. *Sensors*, 2021, vol. 21 (22), art. no. 7659. <https://doi.org/10.3390/s21227659>

Sinyukovich V.N., Chernyshov M.S. Water regime of lake Baikal under conditions of climate change and anthropogenic influence. *Quaternary International*, 2019, vol. 524, pp. 93-101.

Сведения об авторах

Андреев Федор Михайлович

аспирант, кафедра гидрологии и природопользования, географический факультет
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: fmandreev@yandex.ru

Сутырина Екатерина Николаевна

кандидат географических наук, заведующий, кафедра гидрологии и природопользования, географический факультет
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: hydrometeo.conference@geogr.isu.ru

Черкасова Алина Олеговна

студент, географический факультет
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: alinacher95@gmail.com

Шевелев Михаил Александрович

старший преподаватель, кафедра гидрологии и природопользования, географический факультет
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: mikhail.shevelev.01@bk.ru

Information about the authors

Andreev Fedor Mikhailovich

Postgraduate, Department of Hydrology and Nature Management, Faculty of Geography
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: fmandreev@yandex.ru

Sutyryna Ekaterina Nikolaevna

Candidate of Sciences (Geography),
Head of the Department of Hydrology
and Nature Management, Faculty of Geography
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: hydrometeo.conference@geogr.isu.ru

Cherkasova Alina Olegovna

Student, Faculty of Geography
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: alinacher95@gmail.com

Shevelev Mikhail Aleksandrovich

Senior Lecturer, Department of Hydrology
and Nature Management, Faculty of Geography
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: mikhail.shevelev.01@bk.ru

Коды научных специальностей: **1.6.16, 1.6.20, 1.6.21**

Статья поступила в редакцию **10.05.2026**; одобрена после рецензирования **09.09.2026**, принята к публикации **09.09.2026**

The article was submitted **May, 10, 2026**; approved after reviewing **September, 09, 2026**; accepted for publication **September, 09, 2026**