

Методология исследования геосистем Methodology of Geosystems Research

УДК 556.555

DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-2-0-9

EDN LIGVJX

Многолетний мониторинг изменений озера Абрау с использованием данных дистанционного зондирования Земли

¹Коробейников А.В., ^{1,2}Кузякина М.В., ¹Пелина А.Н.

¹Кубанский государственный университет
Россия, 350040, ул. Ставропольская, 149

²Кубанский государственный технологический университет
Россия, 350072, Краснодар, ул. Московская, 2
deskruх@gmail.com, pelina_a@mail.ru, marinavkuzyakina@mail

Аннотация. Проведен комплексный ретроспективный анализ многолетней динамики состояния уникального пресноводного водоема – озера Абрау, по данным дистанционного зондирования Земли (*Landsat 5/8*) за продолжительный период с 1985 по 2021 гг. С использованием комплекса спектральных индексов и методов геоинформационного моделирования выполнена оценка изменений пространственно-временных паттернов, связанных с ключевыми лимнологическими характеристиками водоема. В результате исследований установлена высокая стабильность площади водного зеркала (диапазон колебаний 1,60–1,67 км²) и выявлена статистически значимая связь ее колебаний с работой переливного гидротехнического сооружения. Детальный анализ индекса *NDTI*, используемого в качестве надежного показателя относительной мутности, позволил выявить устойчивую пространственную зону повышенных значений в районе впадения реки Абрау, что убедительно свидетельствует о постоянном поступлении взвешенных наносов и процессе заиления озера. Фиксируются также локальные аномалии *NDTI*, однозначно ассоциированные с работой фонтанной установки. По данным тепловых каналов зафиксирован выраженный тренд к увеличению сезонной амплитуды температуры поверхности воды (*LST*), преимущественно обусловленный ростом летних температур, что может быть связано с уменьшением глубины водоема. Пространственно-временное распределение индекса *NDVI*, рассматриваемого в качестве косвенного индикатора наличия активной биомассы, демонстрирует непостоянный, эпизодический характер, что указывает на отсутствие устойчивых процессов заболачивания и эвтрофикации. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность методов дистанционного зондирования для выявления долгосрочных тенденций и служат научным обоснованием планирования целевых природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: озеро Абрау, дистанционное зондирование Земли, спектральные индексы, мониторинг окружающей среды, *MNDWI*, *NDTI*, температура поверхности (*LST*), *NDVI*

Для цитирования: Коробейников А.В., Кузякина М.В., Пелина А.Н. 2026. Многолетний мониторинг изменений озера Абрау с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Региональные геосистемы, 50 (2): 339–351. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-2-0-9 EDN: LIGVJX

Long-Term Monitoring of Changes in Lake Abrau Using Earth Remote Sensing Data

¹Alexander V. Korobeynikov, ^{1,2}Marina V. Kuzyakina, ¹Alina N. Pelina

¹Kuban State University

149 Stavropolskaya St., Krasnodar 350040, Russia

²Kuban State Technological University

2 Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia

deskruх@gmail.com, pelina_a@mail.ru, marinavkuzyakina@mail

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive retrospective analysis into long-term dynamics of the state of a unique freshwater reservoir, Lake Abrau, according to remote sensing data (Landsat 5/8) from 1985 to 2021. Using a complex of spectral indices and geoinformation modeling methods, the authors assessed the changes in spatiotemporal patterns related to key limnological characteristics of the reservoir. As a result of the research, a high stability of the water mirror area was established (the range of fluctuations is 1.60–1.67 km²), and a statistically significant relationship between its fluctuations and the operation of an overflow hydraulic structure was revealed. A detailed analysis of the NDTI index, used as a reliable indicator of relative turbidity, revealed a stable spatial zone of elevated values in the area of the Abrau River confluence, which strongly indicates the constant influx of suspended sediments and the process of lake siltation. Local NDTI anomalies were also recorded, which are unambiguously associated with the operation of the fountain installation. According to the data of the thermal channels, there is a pronounced trend towards an increase in the seasonal amplitude of water surface temperature (LST), mainly due to an increase in summer temperatures, which may be explained by a decrease in the depth of the reservoir. The spatial and temporal distribution of the NDVI index, considered as an indirect indicator of the presence of active biomass, demonstrates an intermittent, episodic nature, which indicates the absence of stable processes of waterlogging and eutrophication. The results obtained confirm a high efficiency of remote sensing methods for identifying long-term trends and serve as a scientific basis for planning targeted environmental protection measures.

Keywords: Abrau Lake, remote sensing of the Earth, monitoring, water indices, surface temperature, turbidity of water, phytomass, siltation

For citation: Korobeynikov A.V., Kuzyakina M.V., Pelina A.N. 2026. Long-Term Monitoring of Changes in Lake Abrau Using Earth Remote Sensing Data. Regional Geosystems, 50 (2): 339–351 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-2-0-9 EDN: LIGVJX

Введение

Озеро Абрау, являясь крупнейшим пресноводным водоемом Северо-Западного Кавказа, обладает значительной рекреационной, экологической и экономической ценностью для всего региона. В этой связи сохранение устойчивости его экосистемы в условиях возрастающей антропогенной нагрузки [Кропянко, Беспалова, 2013] представляет собой актуальную научно-практическую задачу, решение которой требует поиска и внедрения эффективных инструментов мониторинга состояния подобных уязвимых водных объектов.

Современный уровень развития технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предоставляет уникальные возможности для ретроспективного, оперативного и комплексного анализа водных объектов [Palmer et al., 2015; Pekel et al., 2016]. Однако корректная интерпретация первичных спектральных данных требует тщательного учета методологических ограничений применяемых подходов. Важно понимать, что спектральные индексы (*MNDWI*, *NDTI*, *NDVI*) по своей природе являются безразмерными величинами и отражают не абсолютные значения физических параметров (площадь, мутность, фитомасса), а относительные характеристики, связанные со спектральной

отражательной способностью поверхности в выбранных каналах [Ху, 2006]. Следовательно, их применение в каждом конкретном случае требует тщательного обоснования, понимания области адекватного применения [Торр et al., 2020]. Несмотря на широкую разработанность общих методов исследования озерных экосистем¹, для озера Абрау комплексные исследования, основанные на использовании длительных однородных временных рядов данных ДЗЗ, до настоящего времени остаются фрагментарными и практически отсутствуют [Звянец и др., 2016], что определяет научную новизну настоящего исследования.

Цель исследования заключается в оценке многолетней динамики пространственно-временного распределения комплекса ключевых параметров, характеризующих современное состояние озера Абрау, на основе анализа спектральных индексов и температуры поверхности по данным спутниковой съемки серии спутниковых миссий по наблюдению за поверхностью Земли *Landsat*.

Для достижения поставленной цели были поставлены и последовательно решены следующие задачи:

- оценить многолетнюю динамику площади водной поверхности с использованием индекса *MNDWI* и установить ее связь с работой гидротехнических сооружений;
- проанализировать пространственно-временные изменения относительной мутности воды на основе расчетов индекса *NDTI* и выявить основные источники поступления взвешенных веществ;
- исследовать многолетнюю динамику и пространственную неоднородность температуры поверхности воды (*LST*) и определить основные факторы, влияющие на ее режим;
- оценить изменения пространственно-временного распределения индекса *NDVI* как косвенного индикатора развития активной биомассы в акватории озера.

Объекты и методы исследования

Объектом настоящего исследования выступило озеро Абрау – крупнейший пресноводный водоем Краснодарского края, характеризующийся сложным гидрологическим режимом и значительной антропогенной нагрузкой. Для достижения целей исследования был сформирован репрезентативный массив исходных данных, включивший в себя космические снимки *Landsat 5 TM* (за период 1985–2011 гг.) и *Landsat 8 OLI/TIRS* (за период 2013–2021 гг.). Снимки были тщательно отобраны за характерные летние (июль) и зимние (январь-февраль) сезоны с интервалом в 4–6 лет при условии полного отсутствия облачности над акваторией изучаемого озера [Калимулина, 2019; Yang et al., 2022].

Методика обработки данных ДЗЗ включает последовательное выполнение следующих этапов.

Этап 1 – определение площади водной поверхности. Для точной сегментации акватории и надежного отделения водной поверхности от сопредельных территорий суши был применен модифицированный нормализованный разностный водный индекс (*MNDWI*). Выбор данного индекса обусловлен его доказанной эффективностью в подавлении спектральных шумов, связанных с почвенной и растительной подстилающей поверхностью, а также с застроенными территориями [Ху, 2006]. После расчета индекса для каждой выделенной сцены проводилась процедура бинаризации с последующей ручной корректировкой полученной маски водных объектов для удаления возможных артефактов и неточностей, с дальнейшим подсчетом количества водных пикселей и

¹ Бухарицин П.И. 2012. ГИС и мониторинг водных объектов. Астрахань, Изд-во АГТУ, 323 с.

пересчетом в площадь в соответствии с апробированной в ряде исследований методикой [Лямина и др., 2010; Bai et al., 2023].

Этап 2 – анализ показателя относительной мутности воды. Для выявления и картирования зон с повышенным содержанием взвешенных веществ в акватории озера Абрау был использован индекс *NDTI* (*Normalized Difference Turbidity Index*). Данный индекс демонстрирует высокую чувствительность к изменениям в спектральных каналах, традиционно связанных с проявлением мутности воды [Lasaux et al., 2007]. Необходимо особо подчеркнуть, что *NDTI* является таким относительным показателем, который позволяет проводить корректное сравнение уровня мутности между различными участками акватории и отслеживать его изменения во времени, но не предназначен для прямой количественной оценки мутности в стандартных физических единицах (например, в *NTU*). Для минимизации влияния краевых эффектов, связанных с зоной смешения «вода-суша», анализ проводился в пределах акватории, отстоящей от уточненной береговой линии на 25 м.

Этап 3 – расчет температуры поверхности воды (*LST*). Температура поверхности воды рассчитывалась на основе данных тепловых инфракрасных каналов соответствующих спутниковых сенсоров. Яркостная температура, рассчитанная по исходным цифровым значениям, впоследствии преобразовывалась в значения *LST* с использованием стандартных алгоритмов, учитывающих поправки на излучательную способность поверхности и влияние атмосферы. В дальнейшем анализировалось как пространственное распределение *LST* по акватории, так и ее многолетняя временная динамика.

Этап 4 – анализ индекса *NDVI*. Нормализованный разностный вегетационный индекс (*NDVI*) широко и успешно применяется в мировой практике для качественной оценки состояния растительного покрова, включая задачи выявления зон развития фитопланктона и макрофитов в водной среде [Sòria-Perpinyà et al., 2020; Евдокимов, Штефуряк, 2024]. Следует особо подчеркнуть, что *NDVI* является именно косвенным индикатором, коррелирующим с общим количеством и активностью фотосинтетически активной биомассы, но ни в коей мере не ее прямым измерением. В контексте данного исследования он использовался преимущественно для выявления пространственных неоднородностей и анализа их временной динамики, что позволяет судить о сезонных и многолетних процессах в экосистеме озера.

Результаты и их обсуждение

*Динамика площади водного зеркала (на основе индекса *MNDWI*).*

Проведенные расчеты показали, что площадь озера Абрау оставалась стабильной на протяжении всего исследуемого периода с 1985 по 2021 гг. (табл. 1), демонстрируя лишь незначительные сезонные и межгодовые колебания.

Таблица 1
Table 1

Площадь озера Абрау, км²
Area of Lake Abrau, km²

Год	1985– 1986	1990– 1991	1996	2001	2005– 2007	2010– 2011	2015– 2016	2020– 2021
Июль	1,641	1,674	1,671	1,643	1,613	1,647	1,641	1,632
Январь– февраль	1,623	1,600	1,643	1,615	1,642	1,662	1,641	1,634

Важным результатом является обнаруженная статистически значимая связь между расчетной площадью водного зеркала, полученной по данным *MNDWI* (~1,642 км² и более), и фактом появления воды в переливном водоеме, расположенном ниже основной плотины (рис. 1, табл. 2). Данное наблюдение служит дополнительным косвенным подтверждением адекватности применяемого метода *MNDWI* для оперативного отслеживания изменений уровня воды в озере и корректности полученных количественных оценок, что согласуется с выводами, полученными для других водоемов [Повалишникова и др., 2013].

Таблица 2
Table 2

Наличие переливного водоема за озером в разные годы
Presence of an overflow reservoir behind the lake in different years

Год	1985–1986	1990–1991	1996	2001	2005–2007	2010–2011	2015–2016	2020–2021
Июль	–	+	+	+	–	+	–	–
Январь-февраль	–	–	+	–	+	+	–	–

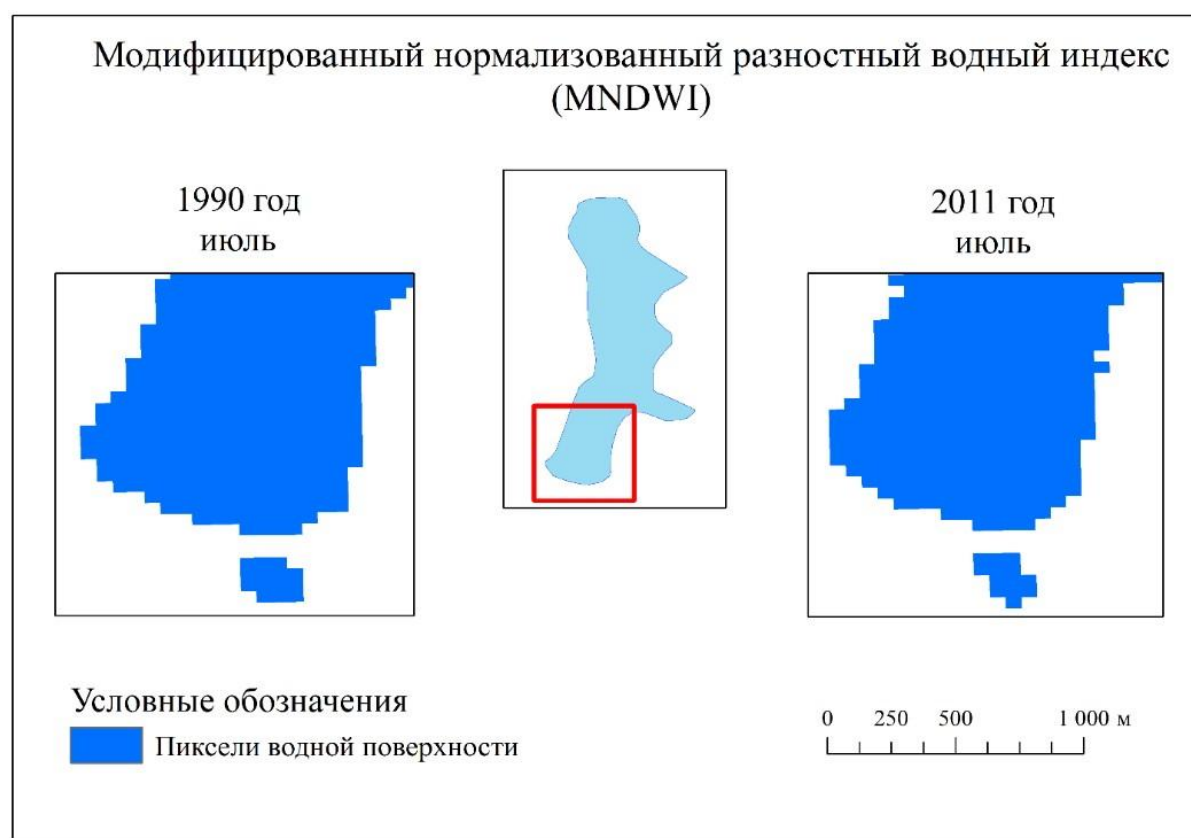


Рис. 1. Вода за переливной плотиной озера Абрау, индекс *MNDWI*
Fig. 1. Water behind the overflow dam of Lake Abrau, *MNDWI* index

Пространственно-временной анализ относительной мутности воды (индекс *NDTI*).

Необходимо отметить, что данный индекс является именно относительным показателем и не предназначен для прямой количественной оценки мутности в стандартных физических единицах без построения калибровочных зависимостей [Тихомиров, Бочаров, 2016; Прокопьева, 2023]. В результате детального анализа распределения значений индекса *NDTI* по акватории озера была выявлена устойчивая, выраженная зона повышенных значений, четко наблюдающаяся в северной части озера в непосредственной близости от места впадения реки Абрау (рис. 2). Полученные данные хорошо подтверждают факт активного поступления взвешенных наносов именно с речным стоком, что является одним из ключевых факторов, ведущих к прогрессирующему заилению чаши водоема [Ефремов и др., 2012].

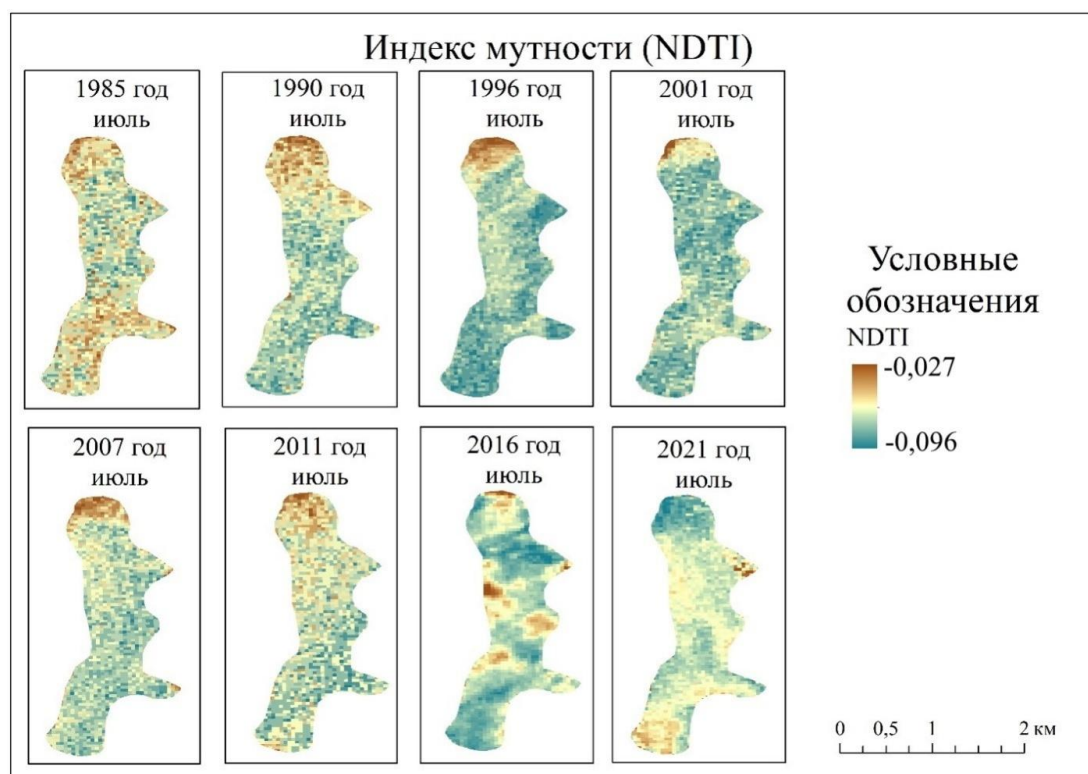


Рис. 2. Картограммы значений индекса *NDTI* в озере для летних снимков
Fig. 2. Maps of *NDTI* index values in the lake for summer images

Помимо этого, на снимках за июль 2016 и 2021 гг. фиксируется локальное повышение значений *NDTI* в северо-восточной части озера, которое однозначно ассоциируется с работой установленного там декоративного фонтана, создающего дополнительное перемешивание водной толщи (рис. 3), аналогичная чувствительность спутниковых данных к резким изменениям антропогенного воздействия на водные объекты демонстрируется и в других исследованиях [Mishra et al., 2020]. Сравнение усредненных значений индекса *NDTI* по всей акватории за разные сезоны показало, что в последнее десятилетие летние показатели, определяющие «мутность», в среднем стали статистически значимо выше зимних, это может быть косвенным свидетельством роста рекреационной и иной антропогенной нагрузки в теплый период года, что также отмечается в исследованиях для других территорий [Илюшина, Сизов, 2023]. Однако для дальнейшего уточнения необходимо провести процедуру верификации результатов расчетов с помощью натурных измерений для установления точных количественных зависимостей [Востокова и др., 1982].

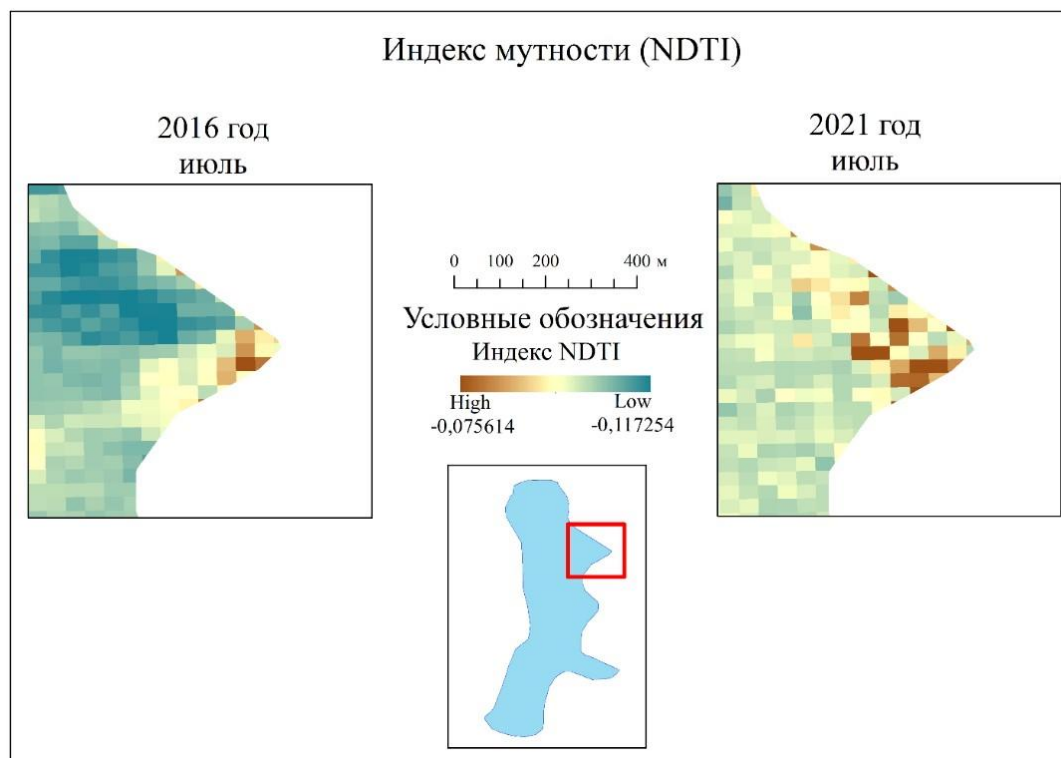


Рис. 3. Локальное повышение значений индекса *NDTI* из-за работы фонтана на озере Абрау
Fig. 3. Local increase in *NDTI* index values due to the operation of a fountain on Lake Abrau

Динамика температуры поверхности воды (*LST*).

В летний период максимальные значения температуры закономерно наблюдаются в прибрежных, хорошо прогреваемых и мелководных зонах (рис. 4). В январе температура у берегов и окружающей территории ниже средней по озеру, а в феврале озеро уже холоднее суши (рис. 5).

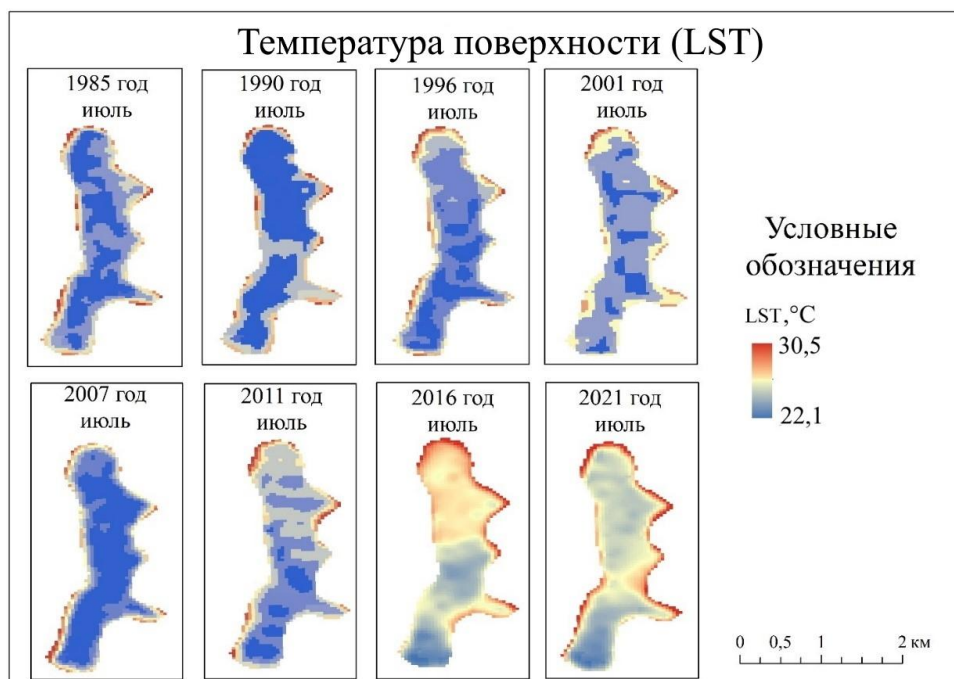


Рис. 4. Картограммы распределения температуры воды (*LST*) в озере летом
Fig. 4. Water temperature distribution (*LST*) charts in the lake in summer

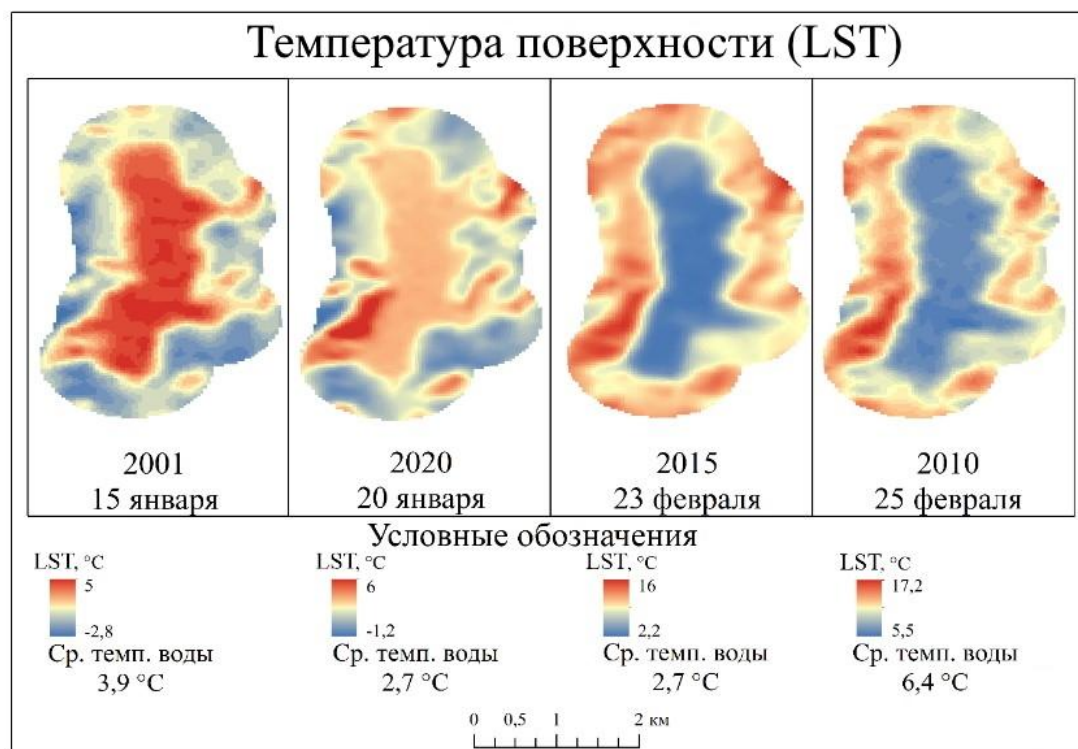


Рис. 5. Картограммы температур (*LST*) озера и прилегающей территории зимой
Fig. 5. Temperature charts (*LST*) of the lake and the surrounding area in winter

Значимым результатом является выявленный тренд к увеличению сезонной амплитуды средних значений индекса *LST* между зимним и летним периодами (рис. 6). Важно, что этот рост преимущественно обусловлен именно повышением летних температур, что согласуется с выдвигаемой гипотезой о снижении общей тепловой инерции озера вследствие уменьшения его средней глубины из-за интенсивного заиления [Winslow et al., 2015; Woolway et al., 2020].



Рис. 6. Изменение средней температуры (*LST*) воды в озере Абрау
Fig. 6. Change in the average temperature (*LST*) of the water in Lake Abrau

Пространственно-временное распределение индекса NDVI.

Анализ распределения значений *NDVI* по акватории озера показал наличие непостоянных, часто меняющих свою локацию от года к году, зон повышенных значений (рис. 7). Интерпретация этих данных в качестве косвенного индикатора развития фотосинтетически активной биомассы позволяет заключить, что наблюдаемое «цветение» воды носит скорее эпизодический, неустойчивый характер и не приводит к формированию стабильных очагов, что свидетельствует о достаточно эффективной естественной циркуляции водных масс, препятствующей длительным застойным явлениям, в отличие от ситуации описанной для некоторых других озер [Liu et al., 2017].

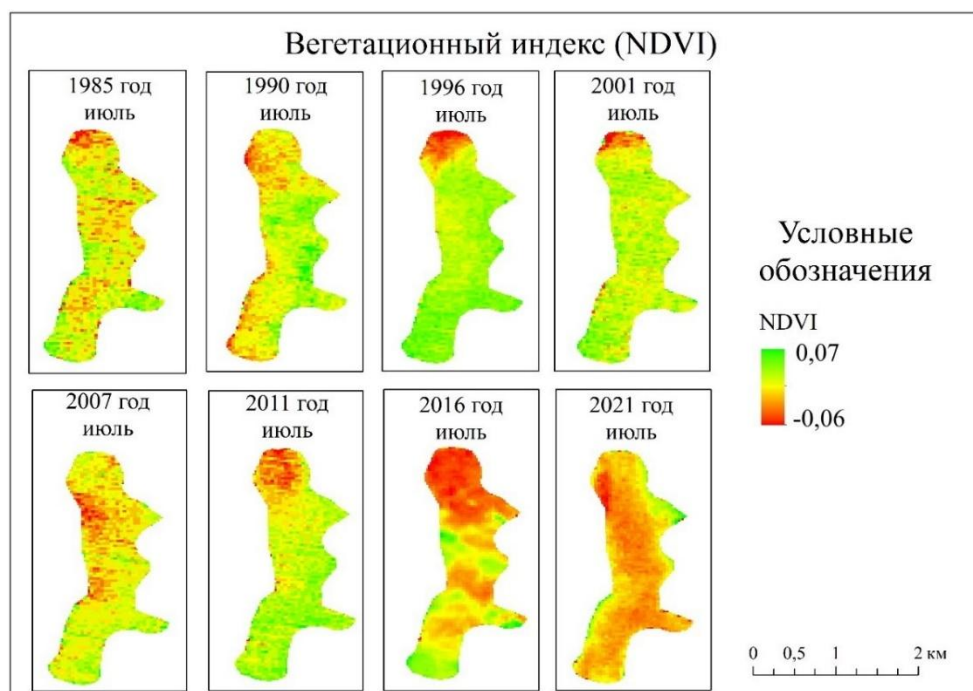


Рис. 7. Картосхемы значений вегетационного индекса (*NDVI*) в озере для летних снимков
Fig. 7. Maps of vegetation index (*NDVI*) values in the lake for summer images

В течение всего периода мониторинга установлено, что значения *NDVI* в летний период (от $-0,04$ до $0,01$) закономерно превышают аналогичные показатели в зимний сезон (от $-0,15$ до $-0,03$). Полученные данные соответствуют сезонной динамике растительности, характеризующейся более высокой фотосинтетической активностью растений в летние месяцы.

Заключение

По результатам многолетнего мониторинга подтверждена высокая стабильность площади водного зеркала озера Абрау, а также впервые выявлена и обоснована связь ее кратковременных колебаний с работой переливного гидротехнического сооружения, что расширяет представления о водном балансе водоема.

2. Детальный анализ индекса *NDTI*, использованного в качестве надежного индикатора относительной мутности, позволил не только выявить устойчивую зону активного поступления взвешенных наносов в районе устья реки Абрау, но и количественно оценить вклад локального антропогенного фактора (работы фонтана) в изменении оптических свойств водной толщи.

3. Установлен статистически значимый тренд к увеличению сезонной амплитуды температуры поверхности воды, в основном обусловленный ростом ее летних значений,

что, вероятно, является индикатором уменьшения глубины водоема и его тепловой инерции вследствие продолжающегося заиления.

4. Пространственно-временной анализ индекса *NDVI*, рассматриваемого в качестве косвенного показателя развития фитомассы, свидетельствует об отсутствии в исследуемый период времени устойчивых пространственных зон его повышенных значений, что указывает на отсутствие признаков необратимых процессов заболачивания и эвтрофирования и подчеркивает роль активного водообмена.

Таким образом, комплексный анализ спектральных индексов и температуры поверхности, выполненный на основе длительных временных рядов спутниковых данных, позволил выявить и количественно охарактеризовать ключевые современные тенденции в состоянии экосистемы озера Абрау. Полученные результаты не только подчеркивают высокую эффективность методов ДЗЗ для решения задач экологического мониторинга, но и ясно указывают на необходимость организации дальнейших, более детальных исследований, в обязательном порядке включающих процедуру верификации спектральных индексов с помощью натурных измерений для установления точных количественных зависимостей. Это станет надежной основой для разработки научно обоснованных мер по сохранению и восстановлению этого уникального природного объекта.

Список литературы

- Востокова Е.А., Шевченко Л.А., Сущеня В.А., Скатерщиков С.В., Кельнер Ю.Г., ... Хачоян А.В. 1982. Картографирование по космическим снимкам и охрана окружающей среды. М., Недра, 251 с.
- Евдокимов С.И., Штефуряк А.В. 2024. Разработка методики определения площади эвтрофикации внутренних водоемов с использованием спутниковых данных. Региональные системы, 48(3): 382–404. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2024-48-3-382-404>
- Ефремов Ю.В., Базелюк А.А., Панов В.Д. 2012. Антропогенное воздействие на озёра Северного Кавказа. География и природные ресурсы, 1: 51–56.
- Звянец А.О., Горбунов О.В., Конышева Е.Н. 2016. Анализ санитарно-гигиенического состояния озера Абрау Краснодарского края с целью негативного влияния на водную экосистему. Символ науки, 7–2(19): 22–24.
- Илюшина Т.В., Сизов А.П. 2023. Исследование динамики рекреационных зон городского округа Самара с помощью методов дистанционного зондирования Земли. Геодезия и картография, 10: 50–55. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2023-1000-10-50-55>
- Калимуллина Г.И. 2019. Применение разновременных космических снимков Landsat для установления береговых линий (границ) водных объектов. В кн.: Экологический сборник. Материалы Всероссийской (с международным участием) молодежной научной конференции, Тольятти, 18–21 апреля 2019. Тольятти, Институт экологии Волжского бассейна РАН: 209–213.
- Кропьянко Л.В., Беспалова Л.А. 2013. Антропогенная деятельность на береговых ландшафтах и проблемы совместимости различных видов хозяйственной деятельности Азово-Черноморского побережья. Международный научно-исследовательский журнал, 17(10–1): 126–129.
- Лямина В.А., Глушкова Н.В., Смоленцева Е.Н., Зольников И.Д. 2010. Использование методов ГИС и ДЗ для мониторинга площади озер и солончаков на территории юга Западной Сибири. Интерэкспо Гео-Сибирь, 4(2): 3–7.
- Повалишников Е.С., Ефимова Л.Е., Головлева В.О. 2013. Применение методов дистанционного зондирования для мониторинга водных объектов в пределах ООПТ. Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук, 2–11(58): 99–106.
- Прокопьева К.Н. 2023. Разработка региональных зависимостей определения мутности воды по данным дистанционного зондирования земли. В кн.: Эрозионные, русловые и устьевые процессы (исследования молодых учёных университетов). Материалы XIII семинара молодых ученых вузов, Набережные Челны, 25–29 апреля 2022. Набережные Челны, Набережночелнинский государственный педагогический университет: 101–107.

- Тихомиров О.А., Бочаров А.В. 2016. Использование данных дистанционного зондирования для оценки показателей мутности воды водных объектов. Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология, 2: 5–11.
- Bai J., Chen X., Li J., Yang L., Fang H. 2023. Monitoring Long-Term Lake Area Dynamics in the Tibetan Plateau Using Landsat Imagery and the Google Earth Engine. *International Journal of Digital Earth*, 16(1): 293–312.
- Lacaux J.P., Tourre Y.M., Vignolles C., Ndione J.A., Lafaye M. 2007. Classification of Ponds from High-Spatial Resolution Remote Sensing: Application to Rift Valley Fever Epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106(1): 66–74.
- Liu H., Li Q., Shi T., Hu S., Wu G., Zhou Q. 2017. Application of Sentinel-2 MSI Images to Retrieve Suspended Particulate Matter Concentrations in Poyang Lake. *Remote Sensing*, 9(7): 761.
- Mishra D.R., Kumar A., Muduli P.R., Equeenuddin Sk.M., Rastogi G., Acharyya T. 2020. Decline in Phytoplankton Biomass Along Indian Coastal Waters due to COVID-19 Lockdown. *Remote Sensing*, 12(16): 2584.
- Palmer S.C., Kutser T., Hunter P.D. 2015. Remote Sensing of Inland Waters: Challenges, Progress and Future Directions. *Remote Sensing of Environment*, 157: 1–8.
- Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. 2026. High-Resolution Mapping of Global Surface Water and Its Long-Term Changes. *Nature*, 540: 418–422.
- Sòria-Perpinyà X., Vicente E., Urrego P., Pereira-Sandoval M., Ruíz-Verdú A., ... Moreno J. 2020. Remote Sensing of Cyanobacterial Blooms in a Hypertrophic Lagoon (Albufera of València, Eastern Iberian Peninsula) Using Multitemporal Sentinel-2 Images. *Science of The Total Environment*, 698: 134305.
- Topp S.N., Pavelsky T.M., Jensen D., Simard M., Ross M.R. 2020. Research Trends in the Use of Remote Sensing for Inland Water Quality Science: Moving Towards Multidisciplinary Applications. *Water*, 12(1): 169.
- Winslow L.A., Read J.S., Hanson P.C., Stanley E.H. 2015. Does Lake Size Matter? Combining Morphology and Process Modeling to Examine the Contribution of Lake Classes to Population-Scale Processes. *Inland Waters*, 5(1): 7–14.
- Woolway R.I., Kraemer B.M., Lenters J.D., Merchant C.J., O'Reilly C.M., Sharma S. 2020. Global Lake Responses to Climate Change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(8): 388–403.
- Xu H. 2006. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14): 3025–3033.
- Yang X., Qin Q., Yésou H., Ledauphin T., Zhu Z. 2022. Thirty Years of Landsat-Derived Lake Surface Water Temperature Reveals Increasing Warming with Higher Rates in Northern Regions. *Remote Sensing of Environment*, 280: 113175.

References

- Vostokova E.A., Shevchenko L.A., Sushchenya V.A., Skatershchikov S.V., Kelner Yu.G., ... Khachoyan A.V. 1982. Kartografirovaniye po kosmicheskim snimkam i okhrana okruzhayushchey sredy [Mapping from Space Imagery and Environmental Protection]. Moscow, Publ. Nedra, 251 p.
- Evdokimov S.I., Shtefuryak A.V. 2024. Development of a Methodology for Determining the Eutrophication Area of Inland Reservoirs Using Satellite Data. *Regional Geosystems*, 48(3): 382–404 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2024-48-3-382-404>
- Efremov Yu.V., Bazelyuk A.A., Panov V.D. 2012. Antropogennoye vozdeystviye na ozera Severnogo Kavkaza [Anthropogenic Impact on the Lakes of the North Caucasus]. *Geografiya i prirodnyye resursy*, 1: 51–56.
- Zvyanets A.O., Gorbunov O.V., Konysheva E.N. 2016. Analiz sanitarno-gigienicheskogo sostoyaniya ozera Abrau Krasnodarskogo kraya s tsel'yu negativnogo vliyaniya na vodnuyu ekosistemu [Analysis of the Sanitary and Hygienic Condition of Lake Abrau in the Krasnodar Krai Regarding its Negative Impact on the Aquatic Ecosystem]. *Simvol nauki*, 7–2(19): 22–24.
- Ilyushina T.V., Sizov A.P. 2023. Studying the Dynamics of Samara City District's Recreational Zones Through the Earth Remote Sensing Methods. *Geodesy and Cartography*, 10: 50–55 (in Russian). <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2023-1000-10-50-55>
- Kalimullina G.I. 2019. Primeneniye raznovremennykh kosmicheskikh snimkov Landsat dlya ustanovleniya beregovykh liniy (granits) vodnykh ob"ektov [Application of Multi-Temporal Landsat Satellite

- Images for Establishing Shorelines (Boundaries) of Water Bodies]. In: *Ekologicheskiy sbornik [Ecological Collection]. Proceedings of the All-Russian (with international participation) youth scientific conference, Tolyatti, 18–21 April 2019. Tolyatti, Publ. Institut ekologii Volzhskogo basseyna RAN: 209–213.*
- Kropyanko L.V., Bepalova L.A. 2013. Anthropogenic Activity on Seaside Coastal Landscapes and Compatibility Problems of Different Kinds of the Azov-Black Sea Coast Economic Activity. *International Research Journal*, 17(10–1): 126–129 (in Russian).
- Lyamina V.A., Glushkova N.V., Smolentseva E.N., Zolnikov I.D. 2010. Use of Methods of GIS and Rs for Monitoring of Change of Lakes and Solonchaks Areas on the Territory of Western Siberia South. *Interexpo GEO-Siberia*, 4(2): 3–7 (in Russian).
- Povalishnikova E.S., Efimova L.E., Golovleva V.O. 2013. *Primenenie metodov distantsionnogo zondirovaniya dlya monitoringa vodnykh obektov v predelakh OOPT [Application of Remote Sensing Methods for Monitoring Water Bodies within Specially Protected Natural Areas]. Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk*, 2–11(58): 99–106.
- Prokopyeva K.N. 2023. *Razrabotka regional'nykh zavisimostey opredeleniya mutnosti vody po dannym distantsionnogo zondirovaniya zemli [Development of Regional Dependencies for Determining Water Turbidity from Remote Sensing Data]. In: Eroziionnyye, ruslovyeye i ust'yevyye protsessy (issledovaniya molodykh uchenykh universitetov) [Erosion, Channel, and Estuary Processes (Research by Young University Scientists)]. Proceedings of the 13th Seminar of Young University Scientists, Naberezhnye Chelny, 25–29 April 2022. Naberezhnye Chelny, Publ. Naberezhnyechelnyinskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet: 101–107.*
- Tikhomirov O.A., Bocharov A.V. 2016. Use of Sensor for Evaluation of Indicators Turbidity Content in Water Reservoir. *Herald of Tver State University. Series: Geography and Geoecology*, 2: 5–11 (in Russian).
- Bai J., Chen X., Li J., Yang L., Fang H. 2023. Monitoring Long-Term Lake Area Dynamics in the Tibetan Plateau Using Landsat Imagery and the Google Earth Engine. *International Journal of Digital Earth*, 16(1): 293–312.
- Lacaux J.P., Tourre Y.M., Vignolles C., Ndione J.A., Lafaye M. 2007. Classification of Ponds from High-Spatial Resolution Remote Sensing: Application to Rift Valley Fever Epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106(1): 66–74.
- Liu H., Li Q., Shi T., Hu S., Wu G., Zhou Q. 2017. Application of Sentinel-2 MSI Images to Retrieve Suspended Particulate Matter Concentrations in Poyang Lake. *Remote Sensing*, 9(7): 761.
- Mishra D.R., Kumar A., Muduli P.R., Equeenuddin Sk.M., Rastogi G., Acharyya T. 2020. Decline in Phytoplankton Biomass Along Indian Coastal Waters due to COVID-19 Lockdown. *Remote Sensing*, 12(16): 2584.
- Palmer S.C., Kutser T., Hunter P.D. 2015. Remote Sensing of Inland Waters: Challenges, Progress and Future Directions. *Remote Sensing of Environment*, 157: 1–8.
- Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. 2026. High-Resolution Mapping of Global Surface Water and Its Long-Term Changes. *Nature*, 540: 418–422.
- Sòria-Perpinyà X., Vicente E., Urrego P., Pereira-Sandoval M., Ruíz-Verdú A., ... Moreno J. 2020. Remote Sensing of Cyanobacterial Blooms in a Hypertrophic Lagoon (Albufera of València, Eastern Iberian Peninsula) Using Multitemporal Sentinel-2 Images. *Science of The Total Environment*, 698: 134305.
- Topp S.N., Pavelsky T.M., Jensen D., Simard M., Ross M.R. 2020. Research Trends in the Use of Remote Sensing for Inland Water Quality Science: Moving Towards Multidisciplinary Applications. *Water*, 12(1): 169.
- Winslow L.A., Read J.S., Hanson P.C., Stanley E.H. 2015. Does Lake Size Matter? Combining Morphology and Process Modeling to Examine the Contribution of Lake Classes to Population-Scale Processes. *Inland Waters*, 5(1): 7–14.
- Woolway R.I., Kraemer B.M., Lenters J.D., Merchant C.J., O'Reilly C.M., Sharma S. 2020. Global Lake Responses to Climate Change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(8): 388–403.
- Xu H. 2006. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14): 3025–3033.
- Yang X., Qin Q., Yésou H., Ledauphin T., Zhu Z. 2022. Thirty Years of Landsat-Derived Lake Surface Water Temperature Reveals Increasing Warming with Higher Rates in Northern Regions. *Remote Sensing of Environment*, 280: 113175.

*Поступила в редакцию 20.08.2025;
поступила после рецензирования 24.10.2025;
принята к публикации 24.11.2025*

*Received August 20, 2025;
Revised October 24, 2025;
Accepted November 24, 2025*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коробейников Александр Владимирович, студент кафедры геоинформатики, Кубанский государственный университет, г. Краснодар Россия

Кузякина Марина Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геоинформатики, Кубанский государственный университет; , доцент кафедры кадастра и геоинженерии Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар Россия

Пелина Алина Николаевна, кандидат географических наук, доцент кафедры геоинформатики, Кубанский государственный университет, г. Краснодар Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Korobeynikov, Bachelor student, Department of Geoinformatics, Kuban State University, Krasnodar, Russia.

Marina V. Kuzyakina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Geoinformatics, Kuban State University, Krasnodar, Russia; Associate Professor, Department of Cadastre and Geoengineering, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia.

Alina N. Pelina, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Geoinformatics, Kuban State University, Krasnodar, Russia.