

Ф. М. Андреев¹, Е. Н. Сутырина²

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ О. ЯРКИ (ОЗ. БАЙКАЛ) НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ NDWI, MNDWI И WRI

АННОТАЦИЯ

В статье описаны результаты работы автоматизированного алгоритма детектирования о. Ярки на спутниковых снимках и оценки его площади с помощью инструментов Python. На основе разработанного алгоритма для автоматизации расчета спектральных индексов WRI (Water Ratio Index), NDWI (Normalized Difference Water Index) и MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) были обработаны 86 спутниковых сцен Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI и Landsat-9 OLI за 2008–2024 гг. Спектральные индексы использовались в работе для выделения суши. Для повышения точности составления маски суши по данным WRI применялась коррекция порога бинаризации с учетом синхронного значения уровня оз. Байкал. Калибровка порога бинаризации обеспечила его адаптивность к колебаниям уровня Байкала. Для определения точности различных алгоритмов оценивалась среднеквадратичная ошибка (RMSE). Построены эталонные маски о. Ярки, выполнено сравнение точности определения площади о. Ярки с помощью автоматизированного алгоритма при расчете с помощью разных индексов — WRI, NDWI и MNDWI. Проведенный анализ показал, что индекс WRI ($RMSE = 0,010 \text{ км}^2$) при коррекции порога бинаризации в зависимости от уровня оз. Байкал демонстрирует наивысшую точность в задачах определения площади о. Ярки по сравнению с другими индексами: NDWI ($RMSE = 0,067 \text{ км}^2$) и MNDWI ($RMSE = 0,087 \text{ км}^2$). Использование коррекции порога позволяет повысить точность идентификации суши по значениям индекса WRI на 20 % по сравнению с использованием фиксированного порога.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционное зондирование, Landsat, водные индексы, морфометрические характеристики, адаптивная бинаризация

Fedor M. Andreyev³, Ekaterina N. Sutyryna⁴

AUTOMATED DETECTION OF YARKA ISLAND (BAIKAL LAKE) BASED ON NDWI, MNDWI AND WRI SPECTRAL INDICES

ABSTRACT

The paper presents the results of an automated algorithm designed to detect Yarki Island on satellite imagery and estimate its area utilizing Python-based tools. Employing the developed algorithm for calculating spectral indices — WRI (Water Ratio Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), and MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) — we

¹ Иркутский государственный университет, ул. Карла Маркса, д. 1, Иркутск, Россия, 664003, e-mail: fmandreev@yandex.ru

² Иркутский государственный университет, ул. Карла Маркса, д. 1, Иркутск, Россия, 664003, e-mail: ensut78@gmail.com

³ Irkutsk State University, 1, Karla Marksa str., Irkutsk, 664003, Russia, e-mail: fmandreev@yandex.ru

⁴ Irkutsk State University, 1, Karla Marksa str., Irkutsk, 664003, Russia, e-mail: ensut78@gmail.com

processed 86 satellite scenes from Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI, and Landsat-9 OLI spanning the period between 2008 and 2024. These spectral indices served as a means to isolate land areas within the image dataset. To enhance the precision of constructing the land mask derived from WRI data, we adjusted the binarization threshold according to synchronously recorded water levels of Lake Baikal. This calibration process enabled the threshold's adaptation to variations in lake water levels. We evaluated the Root Mean Square Error (RMSE) to assess the accuracy of these methods. Additionally, reference masks of Yarki Island were created, allowing us to compare the accuracy of automated area determination using distinct spectral indices: WRI, NDWI, and MNDWI. Our findings revealed that the WRI index demonstrated superior performance with $RMSE = 0.010 \text{ km}^2$ after incorporating adjustments to the binarization threshold corresponding to Lake Baikal's water level. In comparison, the NDWI ($RMSE = 0.067 \text{ km}^2$) and MNDWI ($RMSE = 0.087 \text{ km}^2$) exhibited lower accuracies. By implementing this dynamic threshold adjustment approach, the method improved land detection accuracy based on WRI values by approximately 20 % relative to a static threshold.

KEYWORDS: remote sensing, Landsat, water indices, morphometric characteristics, adaptive binarization

ВВЕДЕНИЕ

О. Ярки представляет собой аккумулятивную структуру, расположенную на севере оз. Байкал и отделяющую от открытой части водоема мелководный Северобайкальский сор, который имеет важное рыбохозяйственное значение, а также является местом концентрации водоплавающих и околоводных птиц, среди которых выделяются виды, занесенные в Красные книги различного ранга: два вида находятся под охраной Международного союза охраны природы, восемь охраняются Красной книгой Российской Федерации, шестнадцать внесены в Красную книгу Республики Бурятия.

О. Ярки препятствует свободному водообмену сора с водами открытой части оз. Байкал и способствует формированию обособленных водных масс и особых гидрологических характеристик и микроклиматических условий в пределах Северобайкальского сора, который благодаря своей защищенности является уникальным естественным биотопом.

Строительство Иркутской ГЭС привело к повышению уровня оз. Байкал, увеличив вероятность эрозии и возможного разрушения о. Ярки. Это создает серьезную угрозу всей флоре и фауне Северобайкальского сора, поскольку изменение характера водообмена способно привести к значительной трансформации температурного режима и химического состава воды в соре, которые оказывают влияние на состояние среды обитания организмов и воспроизводство пищевых цепей. Площадь острова подвержена существенным вариациям, зависящим от колебаний уровня оз. Байкал, регулируемых деятельностью Иркутской ГЭС, а также от процессов седиментации в зонах смешения речных и озерных вод [Потемкина, Потемкин, 2023; Potemkina et al., 2019] и ряда иных природных и техногенных факторов.

Учитывая указанную проблему сохранения целостности природного комплекса, возникает необходимость постоянного контроля состояния о. Ярки с использованием дистанционных методов наблюдения.

Таким образом, целью настоящего исследования становится разработка эффективного автоматизированного алгоритма детектирования острова по материалам космической съемки серии Landsat и оценка ключевых морфометрических характеристик о. Ярки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа использовались спутниковые снимки Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI и Landsat-9 OLI за период 2008–2024 гг.¹, всего 86 сцен, отобранных при уровне облачности менее 5 % для минимизации влияния облаков на точность определения объектов суши. Выбор данных Landsat для проведения исследования обусловлен тем, что они имеют продолжительный ряд наблюдений, захватывающий как маловодные, так и многоводные периоды водности оз. Байкал, которые в свою очередь находят отражение в колебаниях уровня данного водоема. Использовались снимки, охватывающие территорию о. Яркий и прилегающую акваторию дельты р. Верхней Ангары. Предпочтение отдавалось снимкам за летний и ранний осенний период (июнь–сентябрь), которые характеризуются наиболее медленными колебаниями уровня воды в озере. Для учета влияния уровня оз. Байкал использовались данные ежедневного мониторинга уровня на гидропосте оз. Байкал — пос. Нижнеангарск по данным Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО).² Для валидации результатов применялись полученные в процессе «ручной» обработки спутниковых снимков векторные контуры острова. Для анализа использовались ежедневные измерения уровня оз. Байкал, предоставленные архивом АИС ГМВО оз. Байкал — г/п пос. Нижнеангарск. Валидация результатов проводилась с использованием эталонных данных, включая векторные контуры острова, оцифрованные за указанный период. Для минимизации влияния краткосрочных колебаний уровня на анализ применялся критерий стабильности: сцена включалась в обработку, если за 30 дней до и после съемки колебания уровня не превышали $\pm 0,08$ м/мес. Алгоритм расчета площади острова включал несколько ключевых шагов (рис. 1).

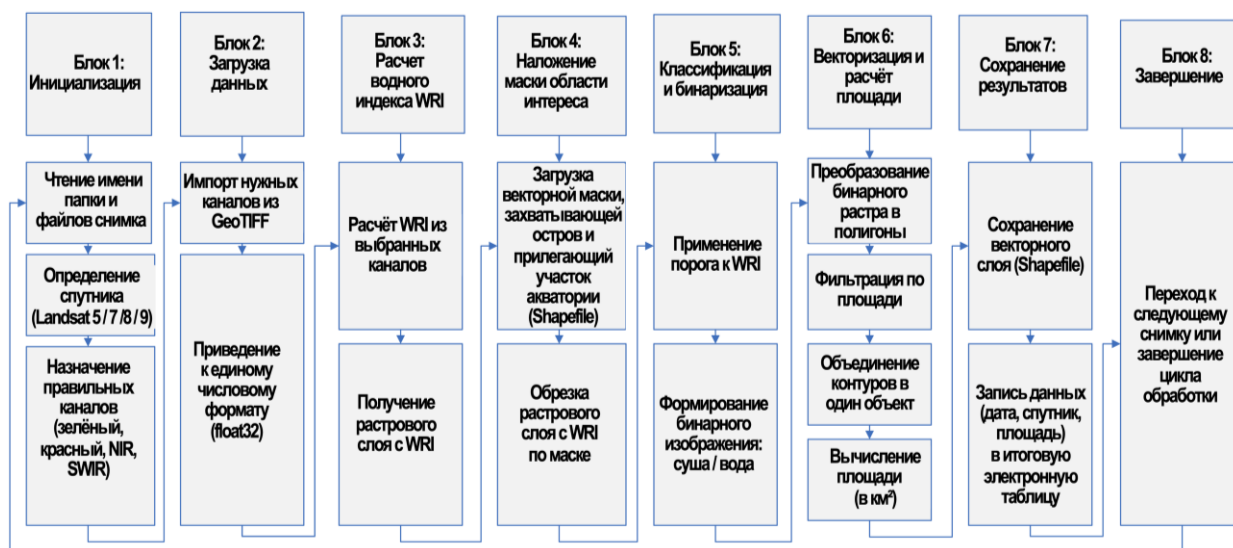


Рис. 1. Алгоритм расчета площади о. Яркий на примере использования индекса WRI
Fig. 1. Algorithm for estimating the area of Yarky Island using the WRI index as an example

На первом этапе проводилась фильтрация спутниковых сцен по критерию наличия облачности в области интереса не более 5 %. Далее для каждой отфильтрованной сцены рассчитывались спектральные индексы WRI, NDWI и MNDWI, которые широко исполь-

¹ United States Geological Survey (USGS). Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 15.02.2024)

² Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Электронный ресурс: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 15.02.2025)

зуются в мировой практике для выделения водных объектов и суши [Курганович, Носкова, 2015; Катаев, Бекеров, 2017; Манилюк, Маслова, 2017; Морозова, 2019; Пшеничников, 2021; Болданова, 2023; Gao, 1996; Ji et al., 2009; Sun et al., 2012; Feyisa et al., 2014; Mustafa et al., 2017; Laonamsai et al., 2023]. Формулы для расчета данных спектральных индексов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Формулы для расчета спектральных индексов
Table 1. Formulas for calculating spectral indices

Спектральный индекс	Формула	Экспликации к формулам
Water Ratio Index	$WRI = (GREEN + RED) / (NIR + MIR)$	GREEN, RED, NIR и MIR — спектральная отражательная способность в зеленом, красном, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном участках электромагнитного спектра соответственно
Normalized Difference Water Index	$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$	
Modified Normalized Difference Water Index	$MNDWI = (GREEN - MIR) / (GREEN + MIR)$	

Для повышения точности WRI применялась коррекция порога бинаризации (пиксели со значением выше порога становятся белыми — класс 1 (поверхность воды), а со значением ниже или равным порогу — черными — класс 0 (суша), порог определялся по формуле (1):

$$L_B = 0,4 + 0,02 \cdot (H_{\text{оз. Байкал}} - 455,50) \quad (1),$$

где L_B — предел (порог) бинаризации, в данной формуле — это динамическое значение, используемое для разделения пикселей спутникового изображения на две категории: «вода» и «не вода».

Базовое значение порога (0,4) было выбрано как оптимальное для WRI при среднем уровне Байкала 455,50 м ТО. Для учета влияния колебаний уровня озера порог корректируется согласно формуле. Коэффициент 0,02 был определен в результате калибровки на данных за 2008–2024 гг. Для определения оптимального значения данного коэффициента в формуле (1) был проведен итеративный процесс калибровки. Исходные данные включали 49 спутниковых снимков Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI и Landsat-9 OLI за период 2008–2019 гг., охватывающих диапазон уровней оз. Байкал в пределах 454,98–455,80 м. Эталонные контуры острова, оцифрованные вручную, использовались для расчета среднеквадратичной ошибки (RMSE) между автоматически рассчитанной и эталонной площадью. Оптимизация проводилась методом градиентного спуска с использованием библиотеки SciPy (v. 1.10.1). Начальное значение коэффициента составило 0,01; шаг изменения — 0,001. На каждой итерации вычислялся RMSE. Если уровень Байкала выше 455,50 м, порог увеличивается, чтобы учесть подтопление, а если ниже — уменьшается, чтобы избежать ложного определения мелководий или влажных почв как воды. Например, при уровне 456,12 м порог составит 0,41 и пиксели со значением $WRI > 0,41$ будут классифицированы как вода, при уровне 454,98 м порог составит 0,39 и пиксели со значением $WRI > 0,39$ будут классифицированы как вода. Это позволяет адаптировать алгоритм к

текущим гидрологическим условиям, повышая точность дешифрования водных объектов. Для оценки точности алгоритма использовалась среднеквадратическая ошибка RMSE (2) (сравнение с эталонными данными — это квадратный корень из средних квадратов различий между предсказанными и наблюдаемыми результатами) и корреляция Спирмена, которая позволила оценить связь между уровнем Байкала и изменением площади острова.

$$RMSE = \sqrt{\frac{(F_1^N - F_1^E)^2 + (F_2^N - F_2^E)^2 + \dots + (F_n^T - F_n^N)^2}{n}} \quad (2),$$

где F_n^T — предсказанное значение (например, площадь острова по WRI),
 F_n^N — эталонное значение (ручные замеры),
 n — количество измерений, соответствует количеству сцен рассматриваемых дат);
ограничения метода включали исключение зимних снимков (ледовый покров).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены результаты детектирования о. Ярки за 2008–2024 гг. Площадь о. Ярки демонстрирует тесную зависимость от уровня оз. Байкал (рис. 3), регулируемого Иркутской ГЭС. Анализ спутниковых данных Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI и Landsat-9 OLI за период с 2008 по 2024 гг. показал, что при повышении уровня озера до 456,12 м ТО площадь острова сокращается до 1,94 км² за счет подтопления прибрежных областей, наиболее подверженных эрозии.



Рис. 2. Векторные маски о. Ярки, полученные для периода 2008–2024 гг. с использованием автоматизированного алгоритма расчета индекса WRI и коррекции порога бинаризации в зависимости от уровня оз. Байкал
 Fig. 2. Vector masks of Yarki Island obtained for the period 2008–2024 using an automated algorithm calculation of the WRI index and correction of the binarization threshold depending on the level of Lake Baikal

Напротив, при понижении уровня до 454,98 м обнажаются песчаные отмели, увеличивая площадь отдельных участков на 0,3–0,7 км² в засушливые годы. Индекс WRI показал более высокую точность (RMSE = 0,010 км²) в задачах создания маски суши по сравнению с NDWI (RMSE = 0,067 км²) и MNDWI (RMSE = 0,087 км²).

За 17 лет наблюдений, в которые вошли и маловодный, и многоводный периоды, площадь о. Ярки изменилась на 0,52 км² при уровнях оз. Байкал, имеющих разницу в 2 см. Фактически одинаковые уровни озера позволили исключить влияние уровня как фактора в конкретные моменты времени. Согласно результатам ряда научных работ [Потемкина, Потемкин, 2023; Potemkina et al., 2019], одной из возможных причин негативных изменений является сокращение стока взвешенных наносов рр. Верхняя Ангара и Кичера в исследуемом периоде, что уменьшает приток осадочного материала в Северобайкальский сор, влияя таким образом на интенсивность процессов седиментации, что может в свою очередь негативно влиять и на размеры о. Ярки.

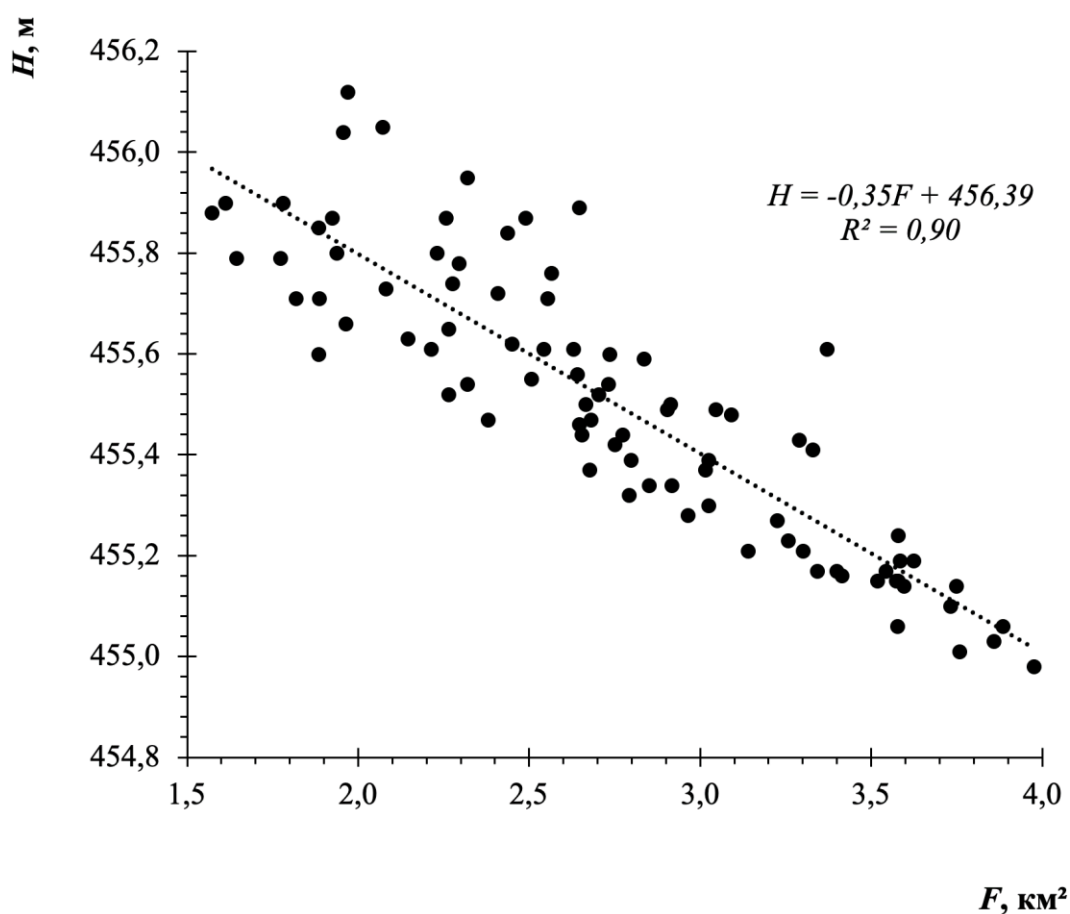


Рис. 3. Связь площадей о. Ярки, полученных в результате обработки спутниковых данных алгоритмом Python, и уровней воды в оз. Байкал

Fig. 3. The relationship between the areas of Yarki Island, obtained as a result of processing satellite data using the Python algorithm, and the water levels in Lake Baikal

Калибровка коэффициента обеспечила адаптивность порога бинаризации L_B к колебаниям уровня Байкала — т. е. позволила использовать пороговые значения, меняющиеся в зависимости от уровня озера. Использование коррекции порога позволяет повысить точность идентификации суши по значениям индекса WRI на 20 % по сравнению с использованием фиксированного порога.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показал, что индекс WRI ($RMSE = 0,010 \text{ км}^2$) при коррекции порога бинаризации в зависимости от уровня оз. Байкал демонстрирует более высокую точность в задачах определения площади о. Ярки по сравнению с другими индексами: NDWI ($RMSE = 0,067 \text{ км}^2$) и MNDWI ($RMSE = 0,087 \text{ км}^2$). Преимущество WRI обусловлено его устойчивостью к повышенной мутности воды и возможностью корректного составления маски суши на его основе при наличии заболоченных территорий.

Разработанный на Python алгоритм для автоматизации расчета спектральных индексов и определения источника данных Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI и Landsat-9 OLI показал высокую эффективность. Время обработки одной сцены сократилось до 5,7 мин. с использованием алгоритма. Это стало возможным благодаря автоматизации ключевых этапов: загрузки данных, расчета индексов, бинаризации, векторизации и экспорта результатов. Алгоритм также включает функцию автоматической фильтрации сцен по уровню облачности и уровню оз. Байкал, что повышает точность и релевантность данных.

В дальнейшем планируется расширить исследование, включив в анализ другие водные индексы, такие как AWEI (Automated Water Extraction Index) и MBWI (Multi-Band Water Index), а также провести более детальное сравнение с данными JRC Global Surface Water. Это позволит оценить универсальность алгоритма для различных типов водных объектов и условий, а также выявить потенциальные улучшения для повышения точности и скорости обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болданова Е. В. Моделирование зависимости площади и объема Посольского сора от уровня оз. Байкал. Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2023. Т. 44. С. 33–43. DOI: 10.26516/2073-3402.2023.44.33.
- Катаев М. Ю., Бекеров А. А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям. Доклады ТУСУР, 2017. Т. 20. № 4. С. 105–108.
- Курганович К. А., Носкова Е. В. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья по данным дистанционного зондирования. Вестник Забайкальского государственного университета, 2015. № 6(121). С. 16–24.
- Манилюк Т. А., Маслова А. В. Исследование водных поверхностей озер путем использования водных индексов по данным дистанционного зондирования. Вестник Забайкальского государственного университета, 2017. Т. 23. № 3. С. 4–11. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-3-4-11.
- Морозова В. А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования. Современные проблемы территориального развития, 2019. № 2. С. 1–12.
- Потемкина Т. Г., Потемкин В. Л. Сток наносов притоков озера Байкал: изменения и тенденцию. Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2023. Т. 43. С. 79–90. DOI: 10.26516/2073-3402.2023.43.79.
- Пиеничников А. Е. Использование спектральных показателей в определении термокарстовых озер по данным дистанционного зондирования. Геоинформатика, 2021. № 2. С. 67–74. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-2-67-74.
- Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S. R. Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery. Remote Sensing of Environment, 2014. No. 140. P. 23–35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.

Gao B.-C. NDWI — A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 1996. V. 58. P. 257–266.

Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009. V. 75. No. 11. P. 1307–1317.

Laonamsai J., Julphunthong P., Saprathet T., Kimmany B., Ganchanasuragit T., Chomcheawchan P., Tomun N. Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for Estimating Erosion and Deposition in Ping River in Thailand. *Hydrology*, 2023. V. 10. P. 70. DOI: 10.3390/hydrology10030070.

Mustafa M., Khalid H., Modher H., Modher A. Using Water Indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI and AWEI) to Detect Physical and Chemical Parameters by Apply Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Research — GRANTHAALAYAH*, 2017. V. 5. P. 117–128. DOI: 10.29121/granthaalayah.v5.i10.2017.2289.

Potemkina T., Sutyryna E., Potemkin V. Changing of the Riverine Sediment Load Supply into Lake Baikal: The Natural and Anthropogenic Causes (Russia). *Quaternary International*, 2019. V. 524. P. 57–66.

Sun F., Sun W., Chen J., Gong P. Comparison and Improvement of Methods for Identifying Waterbodies in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2012. V. 33. No. 21. P. 6854–6875.

REFERENCES

Boldanova E. V. Modeling the Dependence of the Area and Volume of Posolsky Sor on the Level of Lake Baikal. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya “Nauki o Zemle”* (The Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”), 2023. V. 44. P. 33–43 (in Russian). DOI: 10.26516/2073-3402.2023.44.33.

Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S. R. Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2014. No. 140. P. 23–35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.

Gao B.-C. NDWI — A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 1996. V. 58. P. 257–266.

Ji L., Zhang L., Wylie B. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009. V. 75. No. 11. P. 1307–1317.

Kataev M. Yu., Bekerov A. A. Methodology for Detecting Water Bodies Using Multispectral Satellite Measurements. *Proceedings of TUSUR University*, 2017. V. 20. No. 4. P. 105–108 (in Russian).

Kurganovich K. A., Noskova E. V. Using Water Indices to Assess Changes in the Water Surface Areas of Steppe Soda Lakes in the Southeast of Transbaikalia Based on Remote Sensing Data. *Transbaikal State University Journal*, 2015. No. 6(121). P. 16–24 (in Russian).

Laonamsai J., Julphunthong P., Saprathet T., Kimmany B., Ganchanasuragit T., Chomcheawchan P., Tomun N. Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for Estimating Erosion and Deposition in Ping River in Thailand. *Hydrology*, 2023. V. 10. P. 70. DOI: 10.3390/hydrology10030070.

Manilyuk T. A., Maslova A. V. Study of Lake Water Surfaces Using Water Indices Based on Remote Sensing Data. *Transbaikal State University Journal*, 2017. V. 23. No. 3. P. 4–11 (in Russian). DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-3-4-11.

Morozova V. A. Calculation of Indices for Identifying and Analyzing Characteristics of Water Bodies Using Remote Sensing Data. *Current Problems of Territorial Development*, 2019. No. 2. P. 1–12 (in Russian).

Mustafa M., Khalid H., Modher H., Modher A. Using Water Indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI and AWEI) to Detect Physical and Chemical Parameters by Apply Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Research — GRANTHAALAYAH*, 2017. V. 5. P. 117–128. DOI: 10.29121/granthaalayah.v5.i10.2017.2289.

Potemkina T. G., Potemkin V. L. Sediment Runoff of Lake Baikal Tributaries: Changes and Trends. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya “Nauki o Zemle”* (The Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”), 2023. V. 43. P. 79–90 (in Russian). DOI: 10.26516/2073-3402.2023.43.79.

Potemkina T., Sutyryna E., Potemkin V. Changing of the Riverine Sediment Load Supply into Lake Baikal: The Natural and Anthropogenic Causes (Russia). *Quaternary International*, 2019. V. 524. P. 57–66.

Pshenichnikov A. E. Using Spectral Indicators in Identifying Thermokarst Lakes Based on Remote Sensing Data. *Geoinformatika*, 2021. No. 2. P. 67–74 (in Russian). DOI: 10.47148/1609-364X-2021-2-67-74.

Sun F., Sun W., Chen J., Gong P. Comparison and Improvement of Methods for Identifying Waterbodies in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2012. V. 33. No. 21. P. 6854–6875.