



УДК 528.88 (571.54)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.33>

Моделирование зависимости площади и объема Посольского сора от уровня оз. Байкал

Е. В. Болданова*

Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Устанавливается зависимость значений площадей и водоемов Посольского и Малого соров от уровня оз. Байкал. Решаются задачи выбора индексов для определения береговой линии по космоснимкам Sentinel-2, обработки исходных данных, расчета площадей водоемов при разных уровнях Байкала, оценивания параметров модели и применения ее для построения цифровой модели рельефа. Рассматривается ряд индексов для определения границ водоема, на основе показателя общей точности и коэффициента каппа Коэна выбирается индекс NDWI. С помощью ЦМР определялись объемы водоемов. Полученные зависимости позволили сделать заключение, что при уровне оз. Байкал в пределах 456,2–456,8 м по Тихоокеанской системе высот наблюдаются небольшие изменения площадей и объемов, что можно считать безопасным для выживания молоди омуля. Наиболее критичные изменения происходят при снижении уровня озера ниже отметки 456,0 м и превышении значения 457,0 м. Полученные результаты позволяют принимать более взвешенные решения по регулированию уровня озера.

Ключевые слова: Посольский сор, Малый сор, оз. Байкал, Sentinel-2, цифровая модель рельефа, NDWI.

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.33>

Original article

Modeling the Dependence of the Area and Volume of Posolsky Bay from the Level of Lake Baikal

E. V. Boldanova*

Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the issues of regulating the level of Lake Baikal and assessing its consequences. Posolsky and Maly bays of Lake Baikal are of great fishery importance. It is here that the larvae of the omul of Posolsky population feed themselves. The survival of juveniles depends on fluctuations in the areas and volumes of these reservoirs. The purpose of this study is to determine the dependence of the areas and water bodies of the Posolsky and Maly bays on the level of Lake Baikal. To achieve this goal, the tasks of choosing indices for determining the coastline from Sentinel-2 satellite images, processing the initial data, calculating the areas of reservoirs at different levels of Baikal, estimating the model parameters and using it to build a digital elevation model (DEM) were set and solved. A number of indices for determining the boundaries of a reservoir are consid-

ered, and the NDWI index is chosen based on the overall accuracy and Cohen's kappa coefficient. With the help of the DEM, the volumes of reservoirs were determined. The obtained dependencies allowed us to conclude that at the level of the lake. Baikal, within the limits of 456.2-456.8 m of the Pacific height system, slight changes in areas and volumes are observed, which can be considered safe for the survival of omul juveniles. The most critical changes occur when the lake level drops below 456.0 m and exceeds 457.0 m. The results obtained will make it possible to make more informed decisions on lake level regulation.

Keywords: Posolsky Bay, Small Bay, Lake Baikal, Sentinel-2, DEM, NDWI.

For citation: Boldanova E.V. Modeling the Dependence of the Area and Volume of Posolsky Bay from the Level of Lake Baikal. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2023, vol. 44, pp. 33-43. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.33> (in Russian)

Введение

Посольский сор и прилегающий к нему Малый сор – мелководные заливы в юго-восточной части оз. Байкал на территории Республики Бурятия (рис. 1), имеющие большое рыбохозяйственное значение. Здесь нагуливаются личинки омуля посольской популяции, скатывающиеся по р. Большой Речке. От изменений площадей и объемов Посольского и Малого соров зависит выживаемость этих личинок и дальнейший их рост. Уровень озера регулирован, но влияние природных факторов никто не отменял. Поэтому маловодный период может смениться многоводным, что потребует дополнительных усилий по регулированию. Как это повлияет на площади и объемы соров, какие значения уровней окажутся критическими, интересует многие институты, изучающие проблемы Байкала.

В исследовании поставлена цель смоделировать изменение площадей и объемов Посольского и Малого соров под влиянием изменения уровня оз. Байкал. Для достижения этой цели необходимо было решить задачи:

- 1) выбрать информативные индексы для определения границ вода/суша для выбранного района;
- 2) подготовить исходные данные, проведя обработку космоснимков, включая атмосферную и радиометрическую коррекцию с пересчетом значений пикселей в коэффициенты спектральной яркости;
- 3) с использованием выбранного индекса получить границы и значения площадей водоемов для каждого значения уровня озера на основе обработанных снимков;
- 4) выявить зависимость между площадями водоемов и уровнями озера, оценить параметры модели;
- 5) провести отбор фактических данных, соответствующих модельным данным, сделать векторизацию границ водоемов при разных уровнях озера;
- 6) построить цифровую модель рельефа (ЦМР) на основе полученных линий границ, рассчитать изменения объемов соров и получить оценки параметров модели расчета объемов.

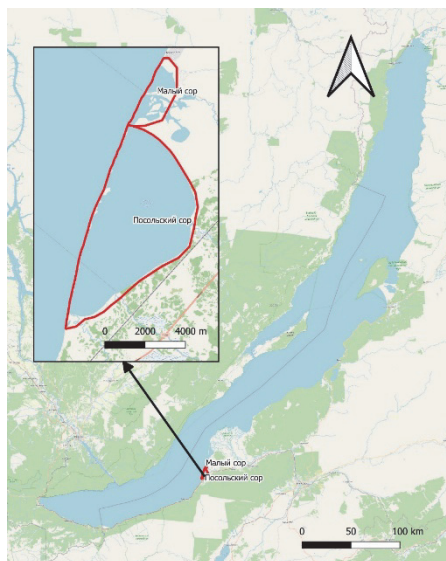


Рис. 1. Расположение и границы Посольского и Малого соров

Материалы и методы исследования

Для расчетов использовались снимки Sentinel-2 за период 2016–2021 гг. [Cornicinus Open Access ... , 2022]. Снимки имеют повторяемость съемки через два дня и полный охват исследуемой территории, но значительную их часть невозможно использовать из-за облачности. Значения яркости снимков были преобразованы в значения комбинированного коэффициента отражения поверхности и атмосферы (Top of Atmosphere (TOA) Reflectance), чтобы уменьшить изменчивость между сценами за счет нормализации солнечного излучения [Congedo, 2018]. Обработка данных осуществлялась в программе QGIS с использованием модуля Semi-Automatic Classification Plugin, позволяющих проведение предварительной обработки снимков. Выбор информативных индексов проводился по снимку Airbus от 23 июня 2021 г. (RGB, пространственное разрешение 1 м, точность 5 м). Уровень оз. Байкал в указанную дату составлял 456,51 м в Тихоокеанской системе высот (ТО). Ближайший по времени съемки снимок Sentinel-2 сделан 04.06.2021 (уровень Байкала 456,29 м). Расчеты проводились с атмосферной коррекцией (RT) и без коррекции, отличий не найдено, коэффициенты совпали. Выбор осуществлялся из известных индексов, получивших широкое распространение для оценки границ водоемов [Использование космических снимков ... , 2019; Применение методов обработки ... , 2020; Погорелов, Липилин, Курносова, 2017; Рылов, Пестунов, 2019; A new index ... , 2020; Analysis of Surface ... , 2020; Assessment of water ... , 2019; Automatic Inundation Mapping ... , 2019; Babaei, Janalipour, Tehrani, 2021; Detection of Changes ... , 2019; Monthly estimation ... , 2020; Sandoval, Escobar-Flores, Sanchez-Ortiz, 2020; Sentinel-2 application ... , 2020; Wieland, Martinis, 2019]:

1) NDWI – нормализованный разностный водный индекс:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} > 0,$$

2) MNDWI(1) – модифицированный нормализованный разностный водный индекс (вариант 1):

$$MNDWI(1) = \frac{GREEN - SWIR1}{GREEN + SWIR1} > 0,$$

3) MNDWI(2) – модифицированный нормализованный разностный водный индекс (вариант 2):

$$MNDWI(2) = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} > 0,$$

4) WRI – индекс влагостойкости:

$$WRI = \frac{GREEN + RED}{NIR + SWIR} > 1,$$

5) AWEI – автоматизированный индекс выделения воды:

$$AWEI = 4 * (GREEN - SWIR1) - (0,25 * NIR + 2,75 * SWIR2) > 0,$$

6) NDVI – вегетационный разностный индекс:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \in [-0,1; 0,2],$$

где GREEN – зеленый (видимый) спектр (B03 Sentinel-2),
 NIR – ближний инфракрасный спектр (B08 Sentinel-2),
 RED – красный (видимый) спектр (B04 Sentinel-2),
 SWIR – средний инфракрасный спектр (B11 или B12 Sentinel-2),
 SWIR1 – средний инфракрасный спектр (B11 Sentinel-2),
 SWIR2 – средний инфракрасный спектр (B12 Sentinel-2).

В формулах приведенных индексов указаны пороговые значения, которые использовались для определения границ водоема.

Основные результаты и их обсуждение

На предварительных этапах расчетов индексы NDVI и MNDWI(2) продемонстрировали неудовлетворительные результаты, поэтому были исключены. Оценка достоверности результатов классификации проводилась по показателю общей точности (процент совпадения пикселей, отнесенных к тому или иному классу в эталонной выборке и проверяемой) и методом, основанным на построении матрицы ошибок классификации [Лурье, 2008], представляющей собой распределение пикселей, верно или неверно определенных при классификации воды и суши. Суша определена оконтуриванием вручную на основе снимков Airbus, вода определена как разность всей выборки и области суши. Получены показатели точности, позволяющие сделать предварительный выбор в пользу NDWI (табл. 1).

Таблица 1

Оценка точности индексов для определения границ водоемов

Индекс	Общая точность, %	Каппа Коэна*
NDWI	85,37	0,71
MNDWI	80,35	0,61
WRI	80,78	0,63
AWEI	75,11	0,52

Примечание. * Критерий согласия для индекса каппа Коэна: $0,81 \leq K \leq 1$ – почти полностью согласуются; $0,61 \leq K \leq 0,80$ – существенно согласуются.

Уровень согласия недостаточный. Сделано предположение, что влияет не только период съемки, но и уровень Байкала. Поэтому далее проводился выбор информативных индексов по снимкам, когда уровень Байкала имел близкое значение к 456,51 м. Радиометрическая коррекция позволила повысить точность определения границ водоемов. Результаты оценки точности индекса NDWI по снимкам в различные периоды представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка точности индекса NDWI по снимкам за разные даты

Дата снимка	Уровень оз. Байкал, м ТО	Общая точность, %	Каппа Коэна
04.07.2020	456,50	90,07	0,80
11.08.2018	456,53	97,94	0,86
02.07.2019	456,57	98,27	0,87
30.06.2019	456,56	98,40	0,89
26.06.2020	456,46	98,48	0,89
01.07.2020	456,49	98,37	0,88
24.06.2020	456,46	98,22	0,87

Подобный анализ был сделан для участков в дельте р. Селенги по снимку MAXAR от 25 июня 2020 г., по о. Ярки и дельте р. Верхней Ангары по снимку Airbus от 13 июня 2019 г., по ровному участку береговой линии Баргузинского залива по снимку Airbus от 3 июля 2019 г. Результаты анализа приведены в работе [Болданова, 2022]. Все эталонные снимки были предоставлены Google Earth, качество снимков RGB, пространственное разрешение 1 м, точность 5 м. Кроме того, была проведена дополнительная проверка для Посольского сора по снимку MAXAR от 1 июля 2022 г., снимок предоставлен компанией ESRI. Снимок RGB, пространственное разрешение 0,46 м, точность 5 м. Для сопоставления был подобран снимок Sentinel-2 от 1 июля 2022 г. (полное совпадение по дате). Общая точность для определения границы вода/суша по индексу MNDWI > 0 составила 99,37 % для ровного участка берега Посольского сора, индекс каппа Коэна равен 0,99, что говорит о хорошей информативности выбранного индекса.

Полученные результаты позволили с уверенностью выбрать индекс NDWI для снимков Sentinel-2 для определения границ водоемов. Далее была сделана обработка порядка 60 безоблачных снимков с атмосферной и радиометрической коррекцией и проведен расчет площади Посольского и Малого соров по индексу NDWI. К сожалению, на качество определения границ во-

доема влияло наличие водорослей, поэтому в июле – августе было выявлено много ошибочных результатов, которые демонстрировали уменьшение площади водоема при увеличении уровня воды в озере. Алгоритм обработки данных пришлось несколько изменить, исключив из рассмотрения периоды, когда наблюдается интенсивный рост водорослей. Кроме того, был изменен порядок расчета: на первом этапе определяются границы суши в интересующем сегменте, на втором этапе исключаются ошибочные мелкие пиксели суши в зоне водоема, относящиеся к водорослям, на третьем рассчитывается разность зоны охвата интересующей области и полученной суши. Полученные данные позволили сделать подбор модели и расчет ее параметров. В наибольшей степени для описания зависимости площадей и Посольского, и Малого соров подошла кубическая парабола (рис. 2 и 3).

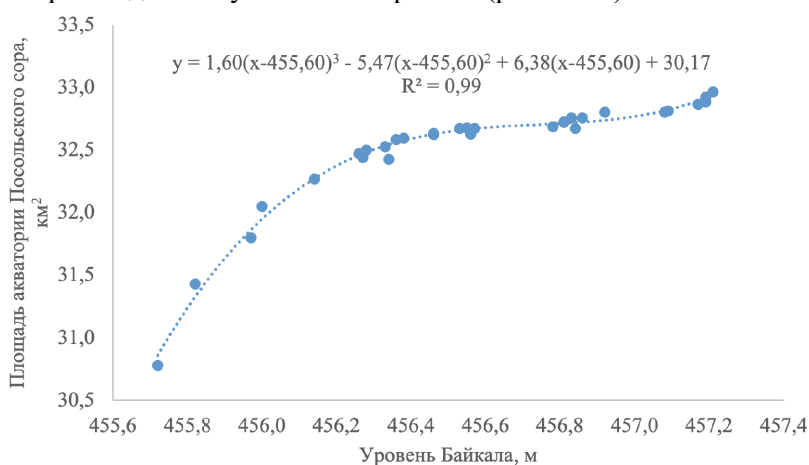


Рис. 2. Зависимость площади акватории Посольского сора от уровня оз. Байкал

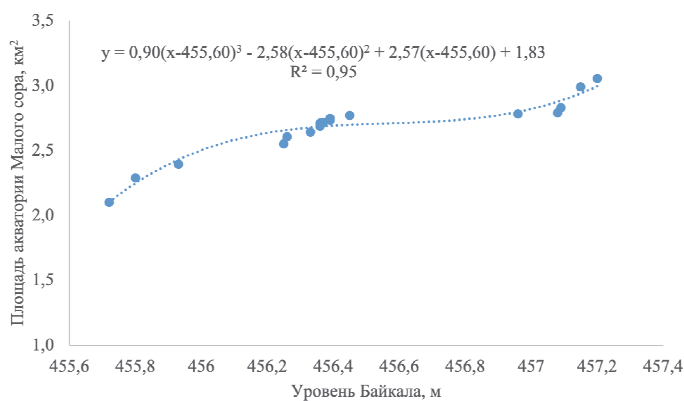


Рис. 3. Зависимость площади акватории Малого сора от уровня оз. Байкал

Проводилась проверка влияния водности р. Большой Речки, но не удалось выявить достоверной зависимости площадей соров от уровня воды в реке. Далее были отобраны снимки, близкие к модельным данным. Пороговое значение для $NDWI \geq 0$. Отобранные растры прошли обработку по исключению ошибочных пикселей, сглаживанию границ. Растр преобразован в вектор. Полигоны преобразованы в линии. Сделана процедура упрощения векторных линий. На основе выявленных границ водоема при разных уровнях (рис. 4), а также данных промеров дна соров и оцифрованных лоций была получена ЦМР, что позволило определить значения изменения объемов соров в зависимости от значений уровня оз. Байкал (рис. 5). Построение ЦМР проводилось в QGIS с использованием инструмента GRASS r.surf.contour (создание раstra высот из растровых контуров). Расчет объемов при разных уровнях воды выполнялся в программе QGIS с помощью инструмента Raster surface volume. В исследовании ставилась задача оценить изменения объемов соров и получить оценки параметров модели расчета объемов. Оценка глубин залива осуществлялась по доступным данным на основе лоций оз. Байкал, ЦМР GEBCO. После построения ЦМР проводилось сравнение с аналогичной ЦМР, выполненной специалистами ФГБУ ЛИН СО РАН на основе имеющихся данных о промерах дна. В результате были получены сходные результаты, расхождение обнаружено в оценке максимальной глубины (расхождение 60 см). Но промеры дна велись на ограниченной площади и имеют ошибку порядка 20 см, а также искажения из-за водорослей, ила и т. п.

Для расчета изменения объемов соров большое значение имеет изменение береговой линии при разных уровнях воды, значение мертвого объема существенной роли не играет. При построении ЦМР в ГИС необходимо задавать очертания дна, поэтому здесь были сделаны модельные допущения. Итоговая модель предполагает оценку изменений объемов начиная с уровня 455,72 м ТО.



Рис. 4. Пример полученных границ водоема при разных уровнях, м

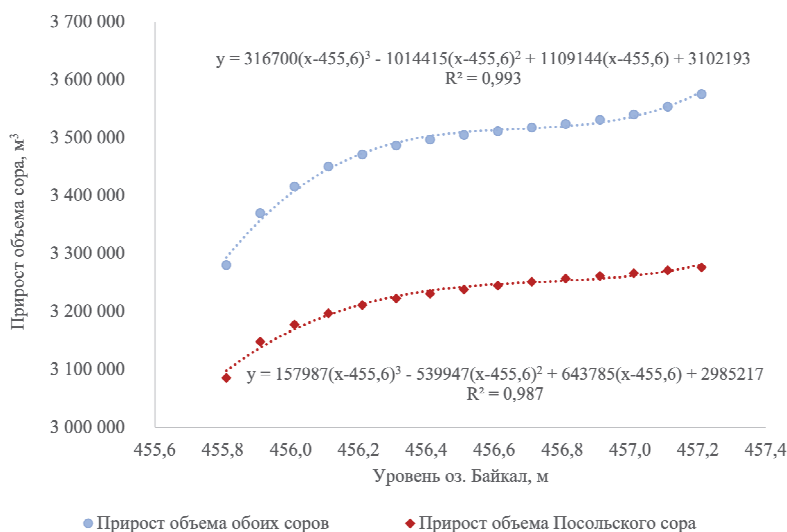


Рис. 5. Зависимость прироста объема отдельно Посольского сора и совместно Посольского и Малого соров от уровня оз. Байкал

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о небольших изменениях площадей и объемов в пределах 456,2–456,8 м ТО регулируемого уровня оз. Байкал. Но выход за пределы, опускание уровня ниже отметки 456 м или превышение отметки 457 м приводит к более существенным изменениям и площадей, и объемов рассматриваемых водоемов. Особенно критично уменьшение площадей и объемов соров в период ската личинок омуля по р. Большой Речке.

Необходимо учитывать не только уровень воды, но и качество вод, степень эвтрофирования интересующих участков [Болданова, 2022, 2023]. В дальнейшем при разрешении промышленного вылова омуля район Посольского сора может иметь важное рыбохозяйственное значение, так же как и другие районы Байкала [Перспективы рыбохозяйственного использования ... , 2020]. Принятие оптимальных управленческих решений позволит обеспечить экологически устойчивое природопользование [Русецкая, Дмитерко, 2017; Русецкая, Быкова, 2020].

Полученные модели зависимости площадей и объемов Посольского и Малого соров оз. Байкал дают возможность оценивать изменения в зависимости от уровня озера, просчитывать последствия для развития личинок омуля, а также другие вероятные ущербы, связанные с колебаниями уровня воды.

Список литературы

Болданова Е. В. Оценка трофности озера Байкал с использованием дистанционного зондирования // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 2(61). С. 73–89. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-2-73-89>

Болданова Е. В. Проверка точности водных разностных индексов по данным ДЗЗ для оценки береговой линии оз. Байкал // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы V Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2023. С. 42–45. <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-2119-3.2023.1-455>

Использование космических снимков для определения границ водоемов и изучения процессов эвтрофикации / Т. И. Кутявина, В. В. Рутман, Т. Я. Ашихмина, В. П. Савиных // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 28–33. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-028-033>

Лурье И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков : учебник. М. : КДУ, 2008. 424 с.

Перспективы рыбохозяйственного использования Маломорского рыбопромыслового района: экономическая оценка и обоснование / А. П. Суходолов, А. П. Федотов, М. М. Макаров [и др.] // Известия Байкальского государственного университета. 2020. Т. 30, № 2. С. 233–244. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2020.30\(2\).233-244](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2020.30(2).233-244)

Позорелов А. В., Литлин Д. А., Курносова А. С. Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Географический вестник = Geographical bulletin. 2017. № 1 (40). С. 130–137. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-1-130-137>

Применение методов обработки и анализа космических снимков для изучения эвтрофированных водоемов (обзор) / Т. И. Кутявина, Г. Я. Кантор, Т. Я. Ашихмина, В. П. Савиных // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 14–25. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-014-025>

Русецкая Г. Д., Быкова Д. Ю. Экологически устойчивое и социально-экономически ответственное природопользование в системе острова Ольхон // Известия Байкальского государственного университета. 2020. Т. 30, № 1. С. 7–13. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2020.30\(1\).7-13](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2020.30(1).7-13)

Русецкая Г. Д., Дмытерко Е. А. Особо охраняемые природные территории – инструмент устойчивого управления природопользованием // Известия Байкальского государственного университета. 2017. Т. 27, № 4. С. 478–487. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2017.27\(4\).478-487](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2017.27(4).478-487)

Рылов С. А., Пестунов И. А. Определение площадей озер по данным со спутников серии Sentinel-2 // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2019. № 5. С. 526–535. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0108>

A new index for identifying water body from Sentinel-2 satellite remote sensing imagery / W. Jiang [et al.] // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2020. Vol. V-3-2020. P. 33–38. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-33-2020>

Analysis of Surface Water Resources Using Sentinel-2 Imagery / U. Bhangale, [et al.] // Procedia Computer Science. 2020. Vol. 171. P. 2645–2654. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.287>

Assessment of water body change and sedimentation rate in Moulay Bouselham wetland, Morocco, using geospatial technologies / M. Karim, M. Maanan, M. Maanan [et al.] // Int. J. Sediment Res. 2019. Vol. 34. P. 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.08.007>

Automatic Inundation Mapping Using Sentinel-2 Data Applicable to Both Camargue and Doñana Biosphere Reserves / G. A. Kordelas, I. Manakos, G. Lefebvre, B. Poulin // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, N 19. 2251. <https://doi.org/10.3390/rs11192251>

Babaei H., Janalipour M., Tehrani N. A. A simple, robust, and automatic approach to extract water body from Landsat images (case study: Lake Urmia, Iran) // Journal of Water and Climate Change. 2021. Vol. 12, N 1. P. 238–249. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.078>

Congedo L. Semi-automatic classification plugin documentation // Release. 2016. Vol. 4, N 0.1. P. 29. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>

Copernicus Open Access Hub. URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (дата обращения: 10.11.2022).

Detection of Changes in Surface Water Bodies Urban Area with NDWI and MNDWI Methods / M. I. Ali, G. D. Dirawan, A. H. Hasim, M. R. Abidin // International Journal on Advanced Science. Engineering and Information Technology. 2019. Vol. 9, N 3. P. 946–951. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.9.3.8692>

Monthly estimation of the surface water extent in France at a 10-m resolution using Sentinel-2 data / X. Yang, Q. Qin, H. Yésou [et al.] // Remote Sens. Environ. 2020. Vol. 244. 111803, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111803>

Sandoval S., Escobar-Flores J. G., Sanchez-Ortiz E. Water Resource Inventory in the Sierra Madre Occidental (Mexico) based on Remote Sensing and GIS // *Invest. Geog.* 2020. N 102. e59975. <https://doi.org/10.14350/rig.59975>

Sentinel-2 application to the surface characterization of small water bodies in wetlands. / J. Pena-Regueiro, M.-T. Sebastiá-Frasquet, J. Estornell, J. A. Aguilar-Maldonado // *Water*, 2020. Vol. 12. P. 1487. <https://doi.org/10.3390/w12051487>

Wieland M, Martinis S. A. Modular Processing Chain for Automated Flood Monitoring from Multi-Spectral Satellite Data // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, N 19. 2330. <https://doi.org/10.3390/rs11192330>

References

Boldanova E.V. Otsenka trofnosti ozera Baikal s ispolzovaniem distantsionnogo zondirovaniya [Evaluation of the trophic status of lake Baikal using remote sensing]. *Geograficheskiy vestnik* [Geographical bulletin], 2022, vol. 2, no. 61, pp. 73-89. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-2-73-89> (in Russian)

Boldanova E.V. Proverka tochnosti vodnykh raznostnykh indeksov po dannym DZZ dlya otsenki beregovoy linii oz. Baykal [Verification of the accuracy of water difference indices according to remote sensing data for assessing the coastline of the lake. Baikal]. *Sovremennyye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii: materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia: materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference]. Irkutsk, ISU Publ., 2023, pp. 42-45. <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-2119-3.2023.1-455> (in Russian)

Kutyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. Ispolzovanie kosmicheskikh snimkov dlya opredeleniya granits vodoemov i izucheniya protsessov evtrofikatsii [The use of satellite images to determine the boundaries of water bodies and study the processes of eutrophication]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology], 2019, vol. 3, pp. 28-33. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-028-033> (in Russian)

Lurie I.K. *Geoinformatsionnoe kartografirovaniye. Metody geoinformatiki i tsifrovoy obrabotki kosmicheskikh snimkov* [Geoinformation mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of space images]. Moscow, KDU Publ., 2008, 424 p. (in Russian)

Sukhodolov A.P., Fedotov A.P., Makarov M.M. [et al.]. Perspektivy rybokhozyaistvennogo ispolzovaniya Malomorskogo rybopromyslovogo raiona: ekonomicheskaya otsenka i obosnovanie [Prospects of fish-husbandry utilization of Maloye more fishing area: economic assessment and substantiation]. *Izvestiya Baikalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Baikal State University], 2020, vol. 30, no. 2, pp. 233-244. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2020.30\(2\).233-244](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2020.30(2).233-244). (in Russian)

Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kurnosova A.S. Sputnikovyi monitoring Krasnodarskogo vodokhranilishcha [Satellite monitoring of the Krasnodar reservoir] *Geograficheskiy vestnik* [Geographical bulletin], 2017, vol. 1, no. 40, pp. 130-137. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-1-130-137> (in Russian)

Kutyavina T.I., Kantor G.Ya., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. Primenenie metodov obrabotki i analiza kosmicheskikh snimkov dlya izucheniya evtrofirovannykh vodoemov (obzor) [Application of methods for processing and analysis of satellite images for the study of eutrophied reservoirs (review)]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology], 2020, vol. 2, pp. 14-25. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-014-025> (in Russian)

Rusetskaya G.D., Bykova D.Yu. Ekologicheski ustoychivoe i sotsialno-ekonomicheski otvetstvennoe prirodopolzovanie v sisteme ostrova Olkhon [Environmentally sustainable and socioeconomically responsible management of natural resources in the ecosystem of Olkhon island]. *Izvestiya Baikalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Baikal State University], 2020, vol. 30, no. 1, pp. 7-13. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2020.30\(1\).7-13](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2020.30(1).7-13) (in Russian)

Rusetskaya G.D., Dmyterko E.A. Osobo okhranyaemye prirodnye territorii – instrument ustoychivogo upravleniya prirodopolzovaniem [Nature conservation areas as a tool of sustainable natural resource management]. *Izvestiya Baikalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Baikal State University], 2017, vol. 27, no. 4, pp. 478-487. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2017.27\(4\).478-487](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2017.27(4).478-487) (in Russian)

Rylov S.A., Pestunov I.A. Opredelenie ploshchadei ozer po dannym so sputnikov serii Sentinel-2 [Assessment of Lakes Areas by Sentinel-2 Satellite Data]. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies], 2019, no. 5, pp. 526-535. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0108> (in Russian)

Jiang W., Ni Y., Pang Z. [et al.]. A new index for identifying water body from Sentinel-2 satellite remote sensing imagery. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. V-3-2020, pp. 33-38, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-33-2020>, 2020

Bhangale U., More S., Shaikh T. [et al.]. Analysis of Surface Water Resources Using Sentinel-2 Imagery. *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 171, pp. 2645-2654. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.287>

Karim M., Maanan M., Maanan M. et al. Assessment of water body change and sedimentation rate in Moulay Bousselham wetland, Morocco, using geospatial technologies. *Int. J. Sediment Res.*, 2019, vol. 34, pp. 65-72, <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.08.007>

Kordelas G.A., Manakos I., Lefebvre G., Poulin B. Automatic Inundation Mapping Using Sentinel-2 Data Applicable to Both Camargue and Doñana Biosphere Reserves. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 19, 2251. <https://doi.org/10.3390/rs11192251>

Babaei H., Janalipour M., Tehrani N.A. A simple, robust, and automatic approach to extract water body from Landsat images (case study: Lake Urmia, Iran). *Journal of Water and Climate Change*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 238-249. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.078>

Congedo L. Semi-automatic classification plugin documentation. *Release*, 2016, vol. 4, no. 0.1, pp. 29. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>

Copernicus Open Access Hub. Available at: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (date of access: 10.11.2022).

Ali M.I., Dirawan G.D., Hasim A.H., Abidin M.R. Detection of Changes in Surface Water Bodies Urban Area with NDWI and MNDWI Methods. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 946-951. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.9.3.8692>

Yang X., Qin Q., Yésou H. [et al.]. Monthly estimation of the surface water extent in France at a 10-m resolution using Sentinel-2 data. *Remote Sens. Environ.*, 2020, vol. 244, 111803. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111803>

Sandoval S., Escobar-Flores J.G., Sanchez-Ortiz E. Water Resource Inventory in the Sierra Madre Occidental (Mexico) based on Remote Sensing and GIS. *Invest. Geog.*, 2020, no. 102, e59975. <https://doi.org/10.14350/ig.59975>

Pena-Regueiro J., Sebastián-Frasquet M.-T., Estornell J., Aguilar-Maldonado J. A. Sentinel-2 application to the surface characterization of small water bodies in wetlands. *Water*, 2020, vol. 12, pp. 1487. <https://doi.org/10.3390/w12051487>

Wieland M., Martinis S. A. Modular Processing Chain for Automated Flood Monitoring from Multi-Spectral Satellite Data. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 19, 2330. <https://doi.org/10.3390/rs11192330>

Сведения об авторе

Болданова Елена Владимировна
кандидат экономических наук, доцент,
кафедра отраслевой экономики и управления
природными ресурсами
Байкальский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11
e-mail: boldanova@mail.ru

Information about the author

Boldanova Elena Vladimirovna
Candidate of Sciences (Economy), Associate
Professor, Department of Sectoral Economics
and Natural Resources Management
Baikal State University
11, Lenin st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: boldanova@mail.ru

Коды научных специальностей: 1.6.16, 1.6.21, 1.6.19.

Статья поступила в редакцию 15.11.2022; одобрена после рецензирования 04.05.2023; принята к публикации 13.06.2023
The article was submitted November, 15, 2022; approved after reviewing May, 4, 2023; accepted for publication June, 13, 2023