

Д. Нұрбекұлы¹, М.Қ. Бейсембекова^{1*}, Г.М. Маемерова¹, З.Б. Ракишева¹

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: beisembekova.meruyert@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА ВОДЫ ОЗЕРА АЛАКОЛЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ

Аннотация

Мониторинг уровня и объема воды помогает обнаружить возможные изменения в расходе воды, а также увеличении или уменьшении уровня объема воды, что может указывать на изменение пути течения или предупреждать о потенциальном затоплении на уровне поверхности. В данной работе для получения данных об уровне и площади воды озера Алаколь мы использовали спутниковую альтиметрию и оптическое дистанционное зондирование. Площадь воды рассчитали с помощью метода нормализованного разностного водного индекса с использованием ряда данных Sentinel-2. С сервиса Hydroweb получены данные об уровне воды и далее использовали модель полиномиальной регрессии для определения площади воды. Эту же регрессионную модель мы используем для преобразования площади воды, рассчитанную с использованием данных Sentinel-2, в уровень воды. Наконец, изменения объема воды рассчитываем по формуле Герона. Анализ полученных результатов показывает сезонную корреляцию изменений уровня воды и объема воды. Интерполированный уровень воды, рассчитанный с помощью данных Hydroweb, показывает хорошее совпадение с уровнем воды, рассчитанным по данным Sentinel-2, с коэффициентом корреляции равным 0,78.

Ключевые слова: озеро Алаколь, полиномиальная регрессия, спутниковая альтиметрия, оптическое дистанционное зондирование, нормализованный разностный индекс воды (NDWI), Hydroweb.

Д. Нұрбекұлы¹, М.Қ. Бейсембекова¹, Г.М. Маемерова¹, З.Б. Ракишева¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ, Қазақстан

ПОЛИНОМИАЛЫҚ РЕГРЕССИЯ АРҚЫЛЫ АЛАКӨЛ КӨЛІНДЕГІ СУ КӨЛЕМІНІҢ ӨЗГЕРІСІН МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа

Судың деңгейі мен көлемін бақылау су шығынындағы ықтимал өзгерістерді және су деңгейінің жоғарылауын немесе азаюын анықтауға көмектеседі, сонымен қатар ағын жолының өзгеруін немесе жер бетіндегі су тасқыны туралы деректерді беруі мүмкін. Бұл жұмыста Алакөл көлінің су деңгейі мен ауданы туралы мәліметтерді алу үшін біз спутниктік альтиметрия мен оптикалық қашықтықтан зондтауды қолдандық. Судың ауданы Sentinel-2 деректерін қолдана отырып, судың нормаланған айырымдық индексі әдісімен есептедік. Hydroweb қызметінен су деңгейі туралы деректер алынып, ары қарай судың ауданын анықтау үшін полиномиялық регрессия моделін қолдандық. Дәл осы регрессия моделін Sentinel-2 деректерінің көмегімен есептелген су ауданын су деңгейіне түрлендіру үшін пайдаланамыз. Ең соңында, су көлемінің өзгеруін Герон формуласымен есептейміз. Алынған нәтижелердің талдауы су деңгейі мен су көлемінің арасындағы маусымдық өзгеру корреляциясын көрсетті. Hydroweb деректері арқылы есептелген интерполяцияланған су деңгейі Sentinel-2 деректері арқылы есептелген су деңгейімен корреляция коэффициенті 0,78-ге тең жақсы сәйкестікті көрсетті.

Түйін сөздер: Алакөл көлі, полиномиялық регрессия, альтиметриялық деректер, Жерді қашықтықтан зондтау, судың нормаланған айырымдық индексі (NDWI), Hydroweb.

D. Nurbekuly¹, M.K. Beisembekova¹, G.M. Mayemerova¹, Z.B. Rakisheva¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

MODELING THE CHANGE OF WATER VOLUME IN ALAKOL LAKE THROUGH POLYNOMIAL REGRESSION

Abstract

Water level and water volume monitoring can help identify possible changes of water flow, as well as water volume changes, which can suggest alteration of waterway flow and potential surface level flooding. In this work, we used satellite altimetry and optical remote sensing to obtain data on the water level and area of Lake Alakol. Water area was calculated using the normalized difference water index method using the Sentinel-2 data series. Water level data was obtained from the Hydroweb service and a polynomial regression model was then used to determine the water area. We use the same regression model to convert water area calculated using Sentinel-2 data to water level. Finally, we calculate changes in water volume using Heron's formula. Analysis of the results obtained shows a seasonal correlation between changes in water level and water volume. The interpolated water level calculated using Hydroweb data shows good agreement with the water level calculated from Sentinel-2 data, with a correlation coefficient of 0.78.

Keywords: Alakol lake, polynomial regression, satellite altimetry, optical remote sensing, Normalized Difference Water Index (NDWI), Hydroweb.

1 Введение

Озера являются одним из главных источников пресной воды. Они покрывают около 87% мировых внутренних вод. Изменение объема воды в озерах обеспечивает информацией о климатических изменениях и водных ресурсах. Для контроля объема внутренних водоемов объединяем оптическое дистанционное зондирование и данные спутниковой альтиметрии [1, 2]. Спутниковая альтиметрия и оптическое зондирование – это две техники дистанционного зондирования, которые могут предоставить параметры, необходимые для оценки изменений объема воды [3]. Оптическое зондирование захватывает изображения поверхности Земли с помощью датчиков, которые обнаруживают видимый или ближний инфракрасный свет. Применяя техники обработки изображений, такие как пороговая обработка, сегментация и классификация, можно извлечь площадь поверхности воды из оптических изображений. Спутниковая альтиметрия измеряет расстояние между спутником и поверхностью Земли с помощью радара или лазерного луча. Спутниковые альтиметры могут измерять высоту поверхности воды относительно эталонного эллипсоида или геоида. Вычитая высоту поверхности земли из высоты поверхности воды, можно получить уровень воды [4].

Многие исследователи использовали оптическое зондирование и спутниковую альтиметрию для оценки изменений объема воды. Например, авторы работы [3] использовали данные MODIS и данные альтиметрии Jason-1/-2/-3 для оценки и анализа изменений объема воды озера Виктория в Африке с 2003 по 2017 год. Исследователи работы [5] использовали данные Landsat и данные альтиметрии Envisat/Cryosat-2 для оценки и анализа изменений объема воды 28 озер и водохранилищ в Техасе с 2003 по 2016 год. Авторы статьи [6] использовали данные Landsat и данные альтиметрии TOPEX/Poseidon для оценки и анализа изменений объема воды озера Нассер в Египте с 1992 по 2002 год. В качестве области исследования мы выбрали озеро Алаколь (рис. 1).

2 Материалы и методы

Озеро Алаколь – одно из крупнейших гидрологически закрытых озер, расположенных в речном бассейне Балхаш-Алаколь на юго-востоке Казахстана. Озеро периодически получает воду из нескольких ручьев, текущих с гор Тарбагатай. Во время сезонных наводнений излишняя вода стекает из озера Жаланашколь в озеро Алаколь по 10-километровому протоку Заман-Откель. Площадь поверхности озера составляет 3033 квадратных километра. Оно достигает глубины около 54 метров на своей максимальной глубине, объем массы воды

составляет 64,517 миллион кубических километров [7]. В таблице 1 можно ознакомиться с морфологическими характеристиками озера Алаколь.



Рисунок 1. Озеро Алаколь (Earthstar Geographics)

Таблица 1. Морфометрические характеристики озера Алаколь

Площадь, км ²	3033.2
Длина, км	104
Ширина, км	53.5
Объем массы воды, млн. м ³	64,517
Длина береговой линии, км	517.5
Уровень воды, м	351.1

Таким образом, для более эффективного использования спутниковой альтиметрии и оптических изображений, в этом исследовании мы используем модель отношений площади воды (далее WA) к уровню воды (далее WL). Это поможет увеличить количество данных для объема воды (далее WV) для более качественного прогноза и анализа. Для этого мы используем данные альтиметрии, предоставленные французским спутниковым мониторинговым агентством Hydroweb (Theia) [8, 9], а также регрессионную модель второго порядка, которую мы используем для восстановления всей WA (и наоборот) из изображений, покрытых облаками. Ниже приведем алгоритм действий в данной работе (рис. 2).

Для дальнейшей работы мы используем оптические снимки, полученные с Sentinel-2 и на их основе по формуле (1) находим нормализованный разностный индекс воды NDWI [10, 11], который предоставляет данные WA

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

где Green – видимый зеленый, NIR – ближний инфракрасный. NDWI (Normalized Difference Water Index) используется для эффективного определения содержания влаги и выделения водоемов на спутниковом снимке на фоне почвы и растительности.

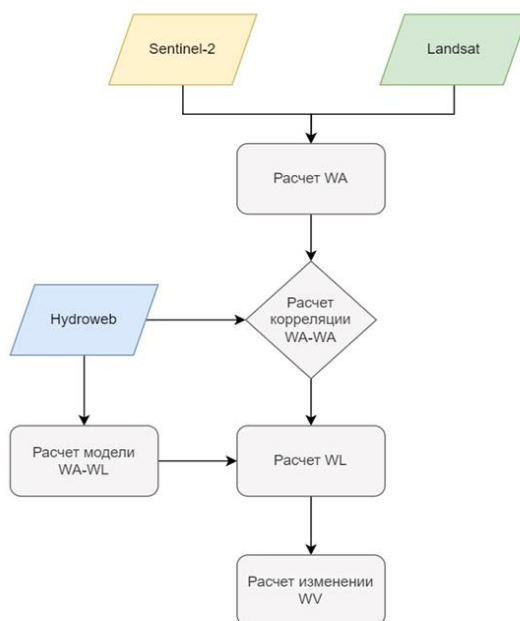


Рисунок 2. Алгоритм исследования

Также, он применяется для обнаружения и мониторинга малейших изменений в содержании водных объектов. Значения NDWI индекса соответствуют следующим диапазонам: 0.2–1 – поверхность воды; 0.0–0.2 – затопление, влажность; -0.3–0.0 – умеренная засуха, неводные поверхности; -1– -0.3 – засуха, неводные поверхности.

Далее объединяя данные WA, полученные с Hydroweb и формулы (1), мы рассчитываем изменение WV.

3 Результаты и обсуждение

Для получения результата были проделаны следующие действия:

1. С помощью Sentinel Hub для исследуемой области (озеро Алаколь) произведен поиск открытых спутниковых снимков на сервисе EO Browser [12]. Выбираем безоблачные изображения озера и скачиваем их. Выявлено, что всего совпадающих данных по дате с данными альтиметрии 5.

2. Вышеизложенные действия в пункте 1 повторяем с космическими снимками со спутников Landsat 4-5 и Landsat 8, которые были скачаны с сервиса USGS Earth Explorer [13]. Оказалось, что всего совпадающих данных по дате с данными альтиметрии 5.

3. После сбора данных обрабатываем снимки в программном обеспечении ArcGIS. Используя каналы B3 (Green) и B8 (NIR, B5 для Landsat) по формуле (1) находим нормализованный разностный индекс воды NDWI.

4. Затем в программном обеспечении ArcGIS создаем новый слой, извлекая все пиксели, значения которых больше либо равно нулю. Это дает нам пиксели воды.

5. Далее используем инструмент «Извлечь по маске» для фильтрации по шейп-файлу Алаколь, то есть оставляем только нужную нам исследуемую область.

6. По формуле (2) рассчитываем WA:

$$WA = \frac{Pixels \times Resolution}{1000000}, \quad (2)$$

где *Pixels* - наименьшая единица растрового изображения, *Resolution* - величина, определяющая четкость деталей растрового изображения.

7. Затем скачиваем данные альтиметрии из архива HydroWeb. HydroWeb собирает значения WL со спутников Saral, Envisat, Cryosat2, Sentinel3A, Sentinel3B. Затем он использует модель для получения значений WA (рис. 3), где WA равна полиномиальной регрессии WL.

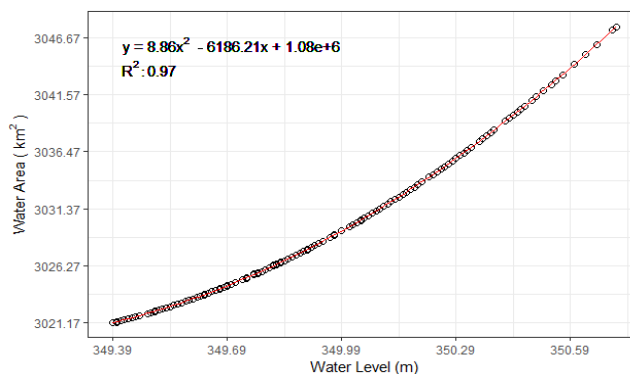


Рисунок 3. Значения WA, полученные с HydroWeb

8. Далее анализируем, изменяются ли значения WA, полученные с Sentinel и Landsat так же, как WA, полученные с HydroWeb [14, 15].

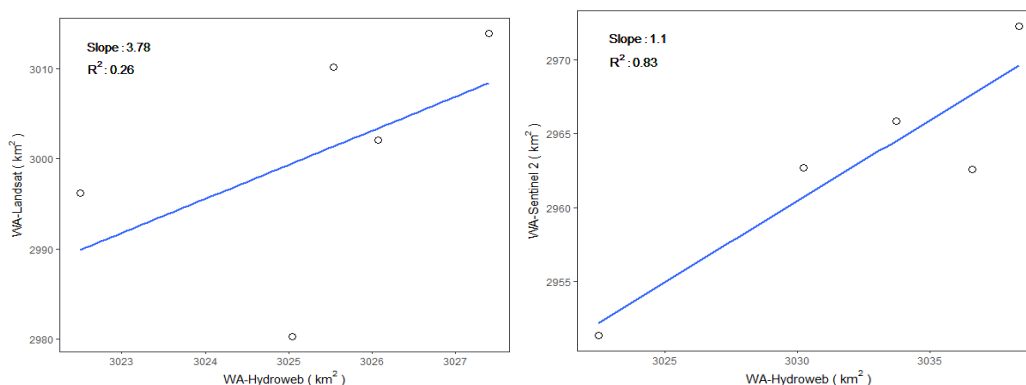


Рисунок 4. Изменение значений WA Sentinel-HydroWeb и WA Landsat- HydroWeb.

Как видим, на рисунке 4 у Sentinel-2 корреляция $R^2 = 0.83$, что означает очень хорошую связь (<0.3 – почти нет связи, $0.3-0.5$ – слабая связь, $0.5-0.7$ – достаточно хорошая связь, >0.7 – сильная связь).

9. Если какой-либо из результатов имеет хорошую корреляцию, тогда дальше мы калибруем WA, чтобы он соответствовал WA HydroWeb, и отображаем данные во времени, чтобы увидеть, совпадают ли изменения площади воды. Как мы видим, на рисунке 5 изображены точки данных обоих методов, которые хорошо дополняют друг друга.

10. Затем, используя выражение WA равна полиномиальной регрессии WL, находим значения WL Sentinel (рис. 6).

11. Наконец, находим WV из всех собранных данных и создаем график изменения WV по времени (рис. 7), используя формулу:

$$\Delta V = \frac{|L_1 - L_2|}{3} (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2}), \quad (3)$$

где ΔV – изменение объема воды по времени, L_2 – уровень воды при начальной дате, L_1 – уровень воды при последующих датах, A_2 – площадь воды при начальной дате, A_1 – площадь воды при последующих датах. Все изменения объема воды находим относительно первого дня.

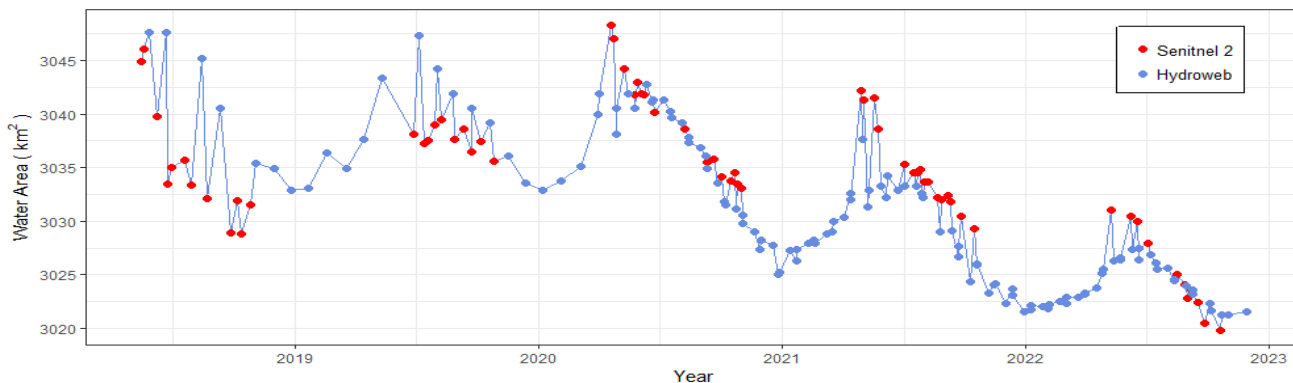


Рисунок 5. Результат калибровки WA

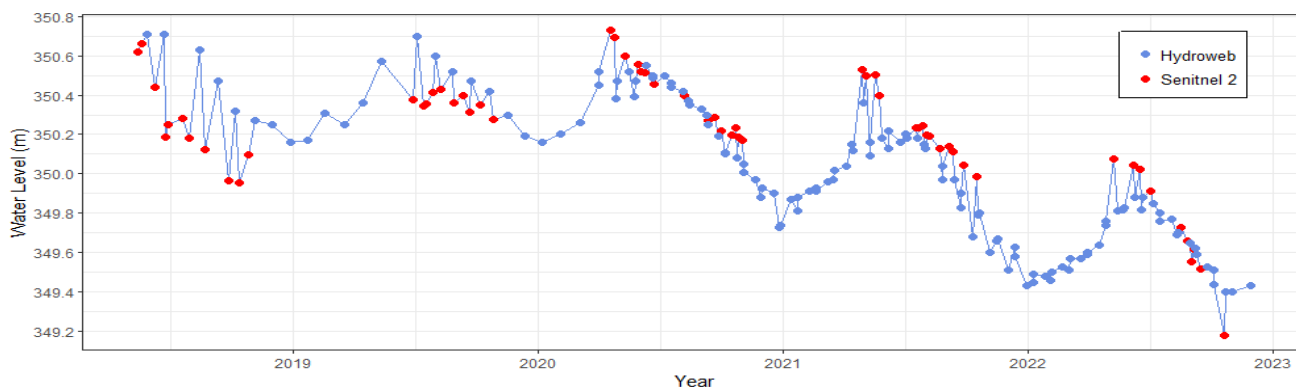


Рисунок 6. Визуализация значений WL для спутника Sentinel

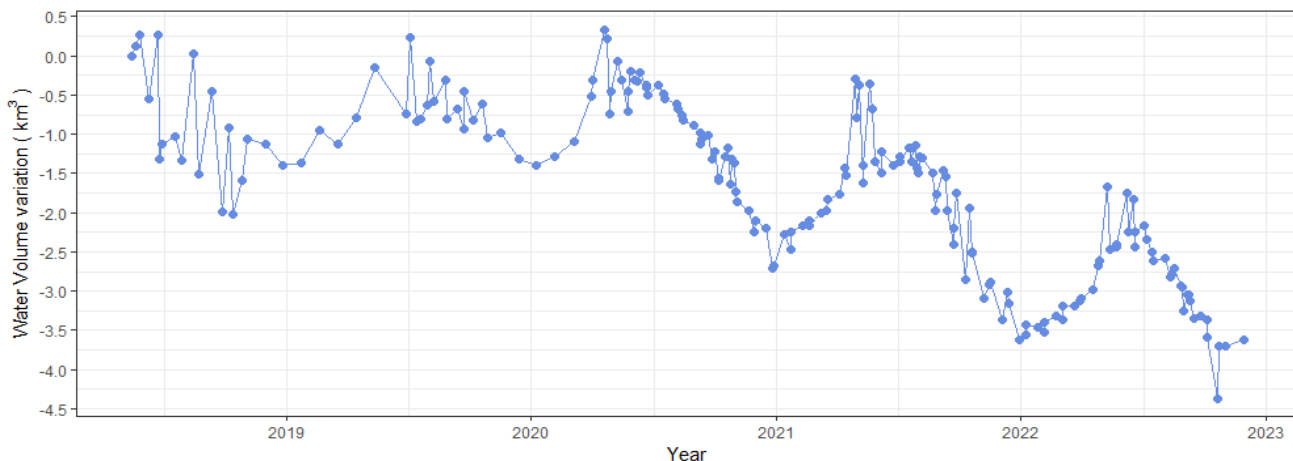


Рисунок 7. Изменение WV по времени

12. Для проверки правильности результатов анализа мы интерполируем WL HydroWeb, чтобы заполнить строки NA (отсутствующие данные), соответствующие Sentinel WL (рис. 8). В итоге, мы получаем хорошую корреляцию $R^2 = 0.61$ с коэффициентом корреляции равным 0.78. Полученный результат означает, что можно использовать снимки Sentinel в сочетании с данными альтиметрии HydroWeb и моделью HydroWeb для мониторинга озер.

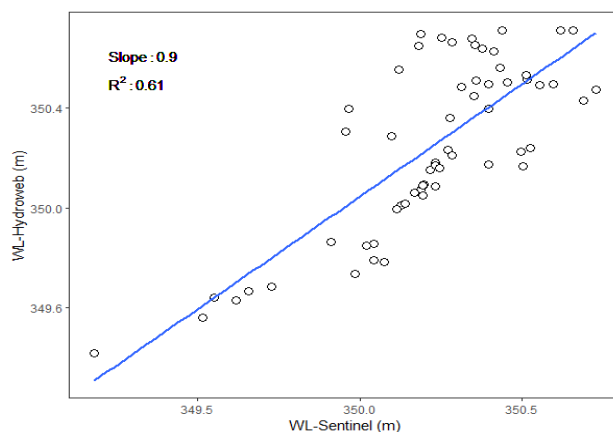


Рисунок 8. Результат интерполяции WL HydroWeb

4 Заключение

Используя оптическое дистанционное зондирование и спутниковую альтиметрию, мы замечаем сезонные изменения объема воды в озере Алаколь. Результаты подтверждены интерполяцией отсутствующих значений данных об уровне воды, полученных с Hydroweb, которые показывают хорошую корреляцию R^2 равную 0.61. Этот подход может быть использован для изучения любого водоема с известной математической зависимостью между уровнем и площадью воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК No AP14871838 – «Исследование волнового климата водоемов Казахстана с применением данных спутниковой альтиметрии»

Список использованной литературы:

- 1 International Altimetry Team. Altimetry for the future: Building on 25 years of progress // *Advances in Space Research*. – 2021. – Vol. 68, Issue 2. – pp. 319-363. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.022>
- 2 A. Mustafa, W.A. Qazi. Using optical remote sensing and radar altimeter data for lake volume estimation of Manchar Lake, Pakistan / *Seventh International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE), Islamabad, Pakistan*. – 2021. – pp. 1-4. doi: 10.1109/ICASE54940.2021.9904130
- 3 Y. Lin, X. Li, T. Zhang, N. Chao, J. Yu, J. Cai, N. Sneeuw. Water volume variations estimation and analysis using multisource satellite data: A case study of lake Victoria // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, Issue 18, article number: 3052. – pp. 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs12183052>
- 4 X. Deng. (2016). Satellite altimetry // *Encyclopedia of Geodesy*. – 2016. – pp. 1-5. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_58-1
- 5 C. Schwatke, D. Detmering, F. Seitz. Volume variations of small inland water bodies from a combination of satellite altimetry and optical imagery // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, Issue 10, article number: 1606. – pp. 1-32. <https://doi.org/10.3390/rs12101606>
- 6 H.M. Ebaïd, M. Aziz. Integrating radar altimeters and optical imagery data for estimating water volume variations in lakes and reservoirs (case study: lake Nasser) // *Journal of Geographic Information System*. – 2017. – Vol. 9, Issue 6. – pp. 648-662. <https://doi.org/10.4236/jgis.2017.96041>
- 7 A. Valeev, M. Karatayev, A. Abitbayeva, S. Uxukbayeva, A. Bektursynova, Z. Sharapkhanova. Monitoring coastline dynamics of Alakol lake in Kazakhstan using remote sensing data // *Geosciences*. – 2019. – Vol. 9, Issue 9, article number: 404. – pp. 1-10. <https://doi.org/10.3390/geosciences9090404>
- 8 <https://hydroweb.theia-land.fr/> [Электронный ресурс] (дата обращения: 02.07.2023).
- 9 Theia/Hydroweb. Hydroweb product user manual. – 2021. [Электронный ресурс] https://www.theia-land.fr/wp-content/uploads/2021/06/Handbook_Hydroweb-V2.1.pdf (дата обращения: 10.07.2023).
- 10 B. Gao. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*. – 1996. – Vol. 58, Issue 3. – pp. 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

- 11 U. Bhangale, S. More, T. Shaikh, S. Patil, N. More. 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>
- 12 <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser> [Электронный ресурс] (дата обращения: 25.06.2023).
- 13 <https://earthexplorer.usgs.gov/> [Электронный ресурс] (дата обращения: 26.06.2023).
- 14 Ch.-M. Lee, Ch.-Y. Kuo, Ch.-H. Yang, H.-Ch. Kao, K.-H. Tseng, W.-H. Lan. Assessment of hydrological changes in inland water body using satellite altimetry and Landsat imagery: A case study on Tsengwen Reservoir // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2022. – Vol. 44. – pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101227>
- 15 J.-F. Cretaux, W. Jelinski, S. Calmant, et al. SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data // *Advances in Space Research*. – 2011. – Vol. 47. – pp. 1497–1507.

References:

- 1 International Altimetry Team. Altimetry for the future: Building on 25 years of progress // *Advances in Space Research*. – 2021. – Vol. 68, Issue 2. – pp. 319-363. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.022>
- 2 A. Mustafa, W.A. Qazi. Using optical remote sensing and radar altimeter data for lake volume estimation of Manchar Lake, Pakistan / *Seventh International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE)*, Islamabad, Pakistan. – 2021. – pp. 1-4. doi: 10.1109/ICASE54940.2021.9904130
- 3 Y. Lin, X. Li, T. Zhang, N. Chao, J. Yu, J. Cai, N. Sneeuw. Water volume variations estimation and analysis using multisource satellite data: A case study of lake Victoria // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, Issue 18, article number: 3052. – pp. 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs12183052>
- 4 X. Deng. (2016). Satellite altimetry // *Encyclopedia of Geodesy*. – 2016. – pp. 1-5. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_58-1
- 5 C. Schwatke, D. Dettmering, F. Seitz. Volume variations of small inland water bodies from a combination of satellite altimetry and optical imagery // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, Issue 10, article number: 1606. – pp. 1-32. <https://doi.org/10.3390/rs12101606>
- 6 H.M. Ebaid, M. Aziz. Integrating radar altimeters and optical imagery data for estimating water volume variations in lakes and reservoirs (case study: lake Nasser) // *Journal of Geographic Information System*. – 2017. – Vol. 9, Issue 6. – pp. 648-662. <https://doi.org/10.4236/jgis.2017.96041>
- 7 A. Valeyev, M. Karatayev, A. Abitbayeva, S. Uxukbayeva, A. Bektursynova, Z. Sharapkhanova. Monitoring coastline dynamics of Alakol lake in Kazakhstan using remote sensing data // *Geosciences*. – 2019. – Vol. 9, Issue 9, article number: 404. – pp. 1-10. <https://doi.org/10.3390/geosciences9090404>
- 8 <https://hydroweb.theia-land.fr/> [Electronic resource] (date of the application: 02.07.2023).
- 9 Theia/Hydroweb. Hydroweb product user manual. – 2021. [Electronic resource] https://www.theia-land.fr/wp-content/uploads/2021/06/Handbook_Hydroweb-V2.1.pdf (date of the application: 10.07.2023).
- 10 B. Gao. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*. – 1996. – Vol. 58, Issue 3. – pp. 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- 11 U. Bhangale, S. More, T. Shaikh, S. Patil, N. More. 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>
- 12 <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser> [Electronic resource] (date of the application: 25.06.2023).
- 13 <https://earthexplorer.usgs.gov/> [Electronic resource] (date of the application: 26.06.2023).
- 14 Ch.-M. Lee, Ch.-Y. Kuo, Ch.-H. Yang, H.-Ch. Kao, K.-H. Tseng, W.-H. Lan. Assessment of hydrological changes in inland water body using satellite altimetry and Landsat imagery: A case study on Tsengwen Reservoir // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2022. – Vol. 44. – pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101227>
- 15 J.-F. Cretaux, W. Jelinski, S. Calmant, et al. SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data // *Advances in Space Research*. – 2011. – Vol. 47. – pp. 1497–1507.