

К.А. Курганович¹, Д.В. Кочев², М.А. Босов³

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНОГО МЕТОДА СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА
ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ LANDSAT
И БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ
УРОВНЕЙ ВОДЫ И ОБЪЕМОВ ВОДНОЙ МАССЫ В ВОДОЕМАХ
(НА ПРИМЕРЕ ОЗ. АРАХЛЕЙ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ)**

АННОТАЦИЯ

Рассмотрено использование гибридного метода реконструкции уровней воды и объемов водной массы водоема на примере оз. Арахлей Забайкальского края. Метод позволяет получить срезы уровней воды по рельефу высокого пространственного разрешения на основании совместного анализа спутниковых снимков системы Landsat разных временных интервалов и снимков с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В результате обработки спутниковых данных Landsat были получены значения площадей водного зеркала оз. Арахлей за период 1987–2018 гг., а по результатам съемки с БПЛА были извлечены уровни воды в озере по датам съемки, соответствующим площадям. Среднеквадратичная ошибка определения уровней воды (RMSE) по сравнению с режимными гидрологическими наблюдениями составила 0,23 м, что ниже, чем горизонтальное разрешение модели рельефа (0,3 м), полученной по данным БПЛА. Также были получены характеристики объема водной массы для изменяемой части объема озера за период 1987–2018 гг. Использование рассмотренного в статье гибридного метода позволит решить проблему недостаточности или полного отсутствия данных о многолетнем водном режиме неисследованных озер и водохранилищ за счет совместной обработки низкодетальной спутниковой информации и высокодетальных данных с БПЛА. Оценка возможностей применения данной технологии за счет сравнения с инструментально полученными характеристиками уровней воды на режимном пункте гидрологических наблюдений, показывает границы ее использования, преимущества и недостатки. При этом главным преимуществом можно признать возможность получить временные ряды изменения уровней и объемов за прошлые годы в тех озерах и водохранилищах, где режимных наземных наблюдений не было никогда. В случае установления зависимостей объемов водной массы от площадей водной поверхности появляется возможность производить оперативный гидрологический мониторинг водоемов, используя только спутниковые снимки Landsat.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морфометрические характеристики озер, беспилотные летательные аппарата, цифровая модель рельефа местности, спектральные водные индексы

¹ Забайкальский государственный университет, Факультет строительства и экологии, ул. Александровская, д. 30, 672039, Чита, Россия, *e-mail*: naptheodor@mail.ru

² Забайкальский государственный университет, Факультет строительства и экологии, ул. Александровская, д. 30, 672039, Чита, Россия, *e-mail*: denis.ko4ev@yandex.ru

³ Забайкальский государственный университет, Факультет строительства и экологии, ул. Александровская, д.30, 672039, Чита, Россия, *e-mail*: max.bosov@mail.ru

Konstantin A. Kurganovich¹, Denis V. Kochev², Maxim A. Bosov³

**THE HYBRID METHOD OF WATER LEVELS AND VOLUMES
RECONSTRUCTING IN THE ARAKHLEY LAKE (TRANS-BAIKAL TERRITORY)
ACCORDING TO LANDSAT REMOTE SENSING DATA
WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES IMAGES FUSION**

ABSTRACT

The use of a hybrid method for reconstructing water levels and volumes of water mass in a reservoir is considered on the example of the Arakhley Lake of the Trans-Baikal Territory. The method makes it possible to obtain high spatial resolution cuts of water levels on the relief based on satellite images of the Landsat system of different time intervals and images from unmanned aerial vehicles (UAVs) as a source of a highly detailed digital elevation model. As a result of processing the Landsat satellite data, the values of the Arakhley Lake surface areas for the period 1987–2018 were obtained. Based on the results of the UAV survey, the water levels in the lake were extracted according to the survey dates corresponding to the areas. The root mean square error of water level determination (RMSE) was 0.23 m, which is lower than the horizontal resolution of the elevation model (0.3 m) obtained from the UAV data. Also, the characteristics of the water mass volume were obtained for the variable part of the lake volume for the period 1987–2018. The use of the hybrid method considered in the article will solve the problem of insufficient or complete absence of data on the long-term water regime of unexplored lakes and reservoirs. Evaluation of the possibilities of using this technology by comparing with the instrumental characteristics of water levels at the regime point of hydrological observations, shows the boundaries of its use, advantages and disadvantages. At the same time, the main advantage can be recognized as the possibility of obtaining time series of changes in levels and volumes over the past years in those lakes and reservoirs where there have never been ground observations and are unlikely to be. In the case of establishing the dependences of the water mass volume on the areas of the water surface, it becomes possible to perform operational hydrological monitoring of water bodies using only Landsat satellite images.

KEYWORDS: morphometric characteristics of lakes, unmanned aerial vehicles, digital terrain model, spectral water indices

ВВЕДЕНИЕ

Озёра и водохранилища играют важную роль в формировании составляющих гидрологического цикла, особенно на территориях с недостаточным увлажнением. Достоверная и актуальная информация о водных ресурсах водоемов является незаменимой для эффективного управления водопользованием регионов, водоемы определяют возможности водообеспечения отраслей экономики и функционирования экосистем. Кроме того, озера и водохранилища являются чувствительными к перераспределению составляющих водного баланса и изменение их морфометрических характеристик может являться численным индикатором климатических изменений и представлять возможности для их пространственно-временного анализа. В то же время сильно разреженная сеть наземных наблюдений за гидрологическим режимом водоемов не позволяет проводить детальный анализ распределения водных ресурсов, сосредоточенных в них. При этом

¹ Transbaikal State University, Faculty of Construction and Ecology, Alexandro-Zavodskaya, 30, 672039, Chita, Russia, e-mail: naptheodor@mail.ru

² Transbaikal State University, Faculty of Construction and Ecology, Alexandro-Zavodskaya, 30, 672039, Chita, Russia, e-mail: denis.ko4ev@yandex.ru

³ Transbaikal State University, Faculty of Construction and Ecology, Alexandro-Zavodskaya, 30, 672039, Chita, Russia, e-mail: max.bosov@mail.ru

большинство водных объектов малых размеров остается не исследованными и не подверженными режимным наблюдениям вообще, и об их многолетнем водном режиме имеется чрезвычайно мало информации.

В настоящее время широко распространенной практикой получения характеристик водных объектов, пространственно-распределенных по акватории, является использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Особенно развит метод оценки площади водного зеркала, включающий в себя расчёт водных спектральных индексов и выделение водной поверхности по некоторому пороговому значению индекса. Расчёт спектральных водных индексов при этом основан на особенностях отражения излучения водной поверхностью в видимой и инфракрасной областях оптического спектра. Наиболее распространенными водными индексами являются нормализованный разностный водный индекс – NDWI [Gao, 1996; Ji, 2009], модифицированный нормализованный разностный водный индекс – MNDWI [Xu, 2006], автоматизированный индекс выделения водной поверхности – AWEI [Feyisa et al., 2014], нормализованный разностный индекс озёр – NDLI [Morriss et al., 2013], нормализованный разностный индекс водоемов – NDPI [Lacaux, 2006]. В качестве исходных данных при этом используются системы спутникового зондирования семейств Landsat, SPOT, MODIS, Sentinel, которые позволяют получать данные различного пространственного и спектрального разрешения. Наличие разных уровней обработки спутниковых продуктов позволило организовать автоматизированные оперативные системы мониторинга за изменением морфометрических характеристик озёр и водохранилищ [Chipman, 2019].

В то же время для более качественного анализа изменчивости гидрологического режима озёр и водохранилищ требуется не только анализ площадей, но и их объёмных характеристик. В идеальном варианте характеристики объёмов водной массы в водоемах должны быть определены с использованием батиграфических измерений топографии рельефа дна. В масштабе региона такая задача представляется труднореализуемой.

Компромиссным вариантом перехода от площадей водного зеркала к объёму воды может быть дистанционное получение сведений об отметках уровня воды в водоемах, которое обычно проводится с использованием методов радиоальтиметрии, лазерной альтиметрии [Лебедев, 2013]. Спутниковая радиоальтиметрия представлена широко и для исследования уровенных режимов доступна обширная информация по данным нескольких систем дистанционного зондирования, многие из которых работают до сих пор и образуют непрерывный ряд наблюдений – ERS-1, ERS-2, TOPEX/Poseidon, Envisat, Jason-1, Jason-2/OSTM, Jason-3, SARAL. На базе этих спутниковых данных построена система глобального мониторинга водохранилищ и озёр – GlobalReservoirsandLakesMonitor (G-REALM), которая содержит сведения об изменении уровня воды в крупных водоемах [Chipman, 2019]. В области лазерной альтиметрии наиболее распространенными источниками данных в разное время являлись и остаются до сих пор спутниковые лазерные альтиметры ICESat-1/GLAS (2003–2010 гг.) и ICESat-2/ATLAS (2018 – н.в.) [Nan et al., 2020; Wang et al., 2011].

По сравнению с системами лазерной альтиметрии разрешение у систем радиоальтиметрии гораздо ниже, в связи с чем возможность исследования уровенного режима предоставляется только для крупных озёр и водохранилищ. А.В. Шаликовский с соавторами для изучения режима озера Далай-Нор (КНР) использовали данные системы G-REALM и установили зависимость колебания уровня озера от проводимых водохозяйственных мероприятий на территории КНР [Шаликовский и др., 2018]. С.А. Лебедев, используя данные спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, произвел анализ гидродинамического режима Каспийского моря и рассчитал поля аномалий его уровня [Лебедев, 2013; 2015]. Ю.И. Троицкая с соавторами использовали алгоритм регионального адаптивного ретрекинга для определения уровней воды в акваториях Горьковского и Рыбинского водохранилищ по данным спутниковой альтиметрии Jason-1 [Троицкая и др., 2012]. М.В. Колмакова с соавторами для оценки площадей затопляемых и переувлажненных территорий Западно-Сибирской равнины использовали данные радарной альтиметрии TOPEX/Poseidon [Колмакова и др., 2012].

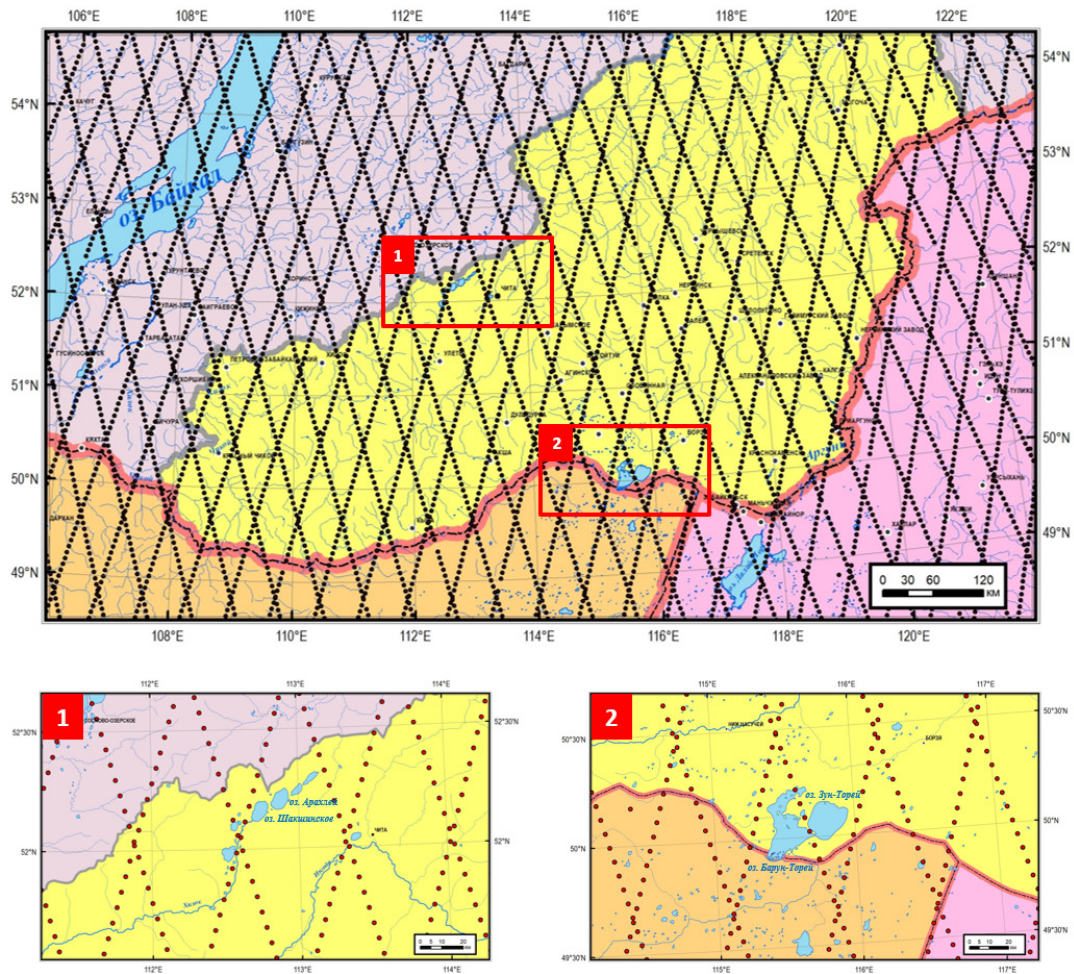


Рис. 1. Покрывание территории Забайкальского края треками Envisat RA-2
 Fig. 1. Covering the territory of the Trans-Baikal Territory with Envisat RA-2 tracks

В меньших по размерам озерах и водохранилищах из-за низкого разрешения радиоальтиметрической съемки данные об уровнях на постоянной основе получить затруднительно. В условиях Забайкалья даже самые крупные озерные системы – Ульда-Торейская (площади озер в самые многоводные годы: Барун-Торей – 580 км², Зун-Торей – 300 км²) и Ивано-Арахлейская (оз. Арахлей – 59 км², оз. Шакшинское – 51,8 км²) обладают размерами меньшими, чем требуется для получения постоянных временных рядов уровней по данным спутниковой радиоальтиметрии (рис. 1); более мелкие озера с отсутствующими режимными гидрологическими наблюдениями таким исследованиям не могут быть подвергнуты вовсе. Исключением является самое крупное по площади в многоводный период оз. Барун-Торей, по которому С.Т. Им с соавторами исследовали динамику уровней водной поверхности по данным альтиметрии спутника Envisat [Им и др., 2015]. Однако и эти исследования возможны только в сравнительно короткий по продолжительности многоводный период.

Таким образом, с целью дистанционного получения данных об уровненом режиме неизученных водоемов требуется использование другого подхода. В данном вопросе в качестве подходящей оценки уровня воды может быть предложена идея о комбинировании космических снимков озер или водохранилищ в оптическом диапазоне и уже существующей цифровой модели рельефа дна и береговой линии. Ранее под руководством авторов были проведены работы для определения зон затопления при наводнениях с использованием гибридного метода повышения разрешающей способности данных ДЗЗ за счет совместного использования снимков системы Landsat в качестве поставщика ретроспективных данных о площадях водного зеркала и снимков

с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), выполненных в межлетний период в качестве источника высокодетальной цифровой модели рельефа [Курганович, Босов, 2018]. Аналогичный подход применительно к водоемам позволил бы получить срезы уровней воды по рельефу дна и береговой линии высокого пространственного разрешения на основании спутниковых снимков разных временных интервалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера использования методики ретроспективной реконструкции уровней воды водоема с использованием дистанционных методов выбрано озеро Арахлей, которое является самым крупным из группы Ивано-Арахлейских озер на территории Забайкальского края и имеет наибольшую площадь водной поверхности, глубину и объем. Ивано-Арахлейские озера расположены в Центральном Забайкалье, на юге Витимского плоскогорья в пределах Беклемишевской тектонической впадины между Яблоновым и Осинovým хребтами в северо-восточном направлении (рис. 2). Озеро Арахлей имеет рекреационное значение для жителей г. Читы, используется для целей рыбозаведения и рыбной ловли, в то же время испытывает высокую рекреационную нагрузку, а растительный покров водосборной территории претерпевает существенные изменения вследствие пожаров [Обязов, 2011].

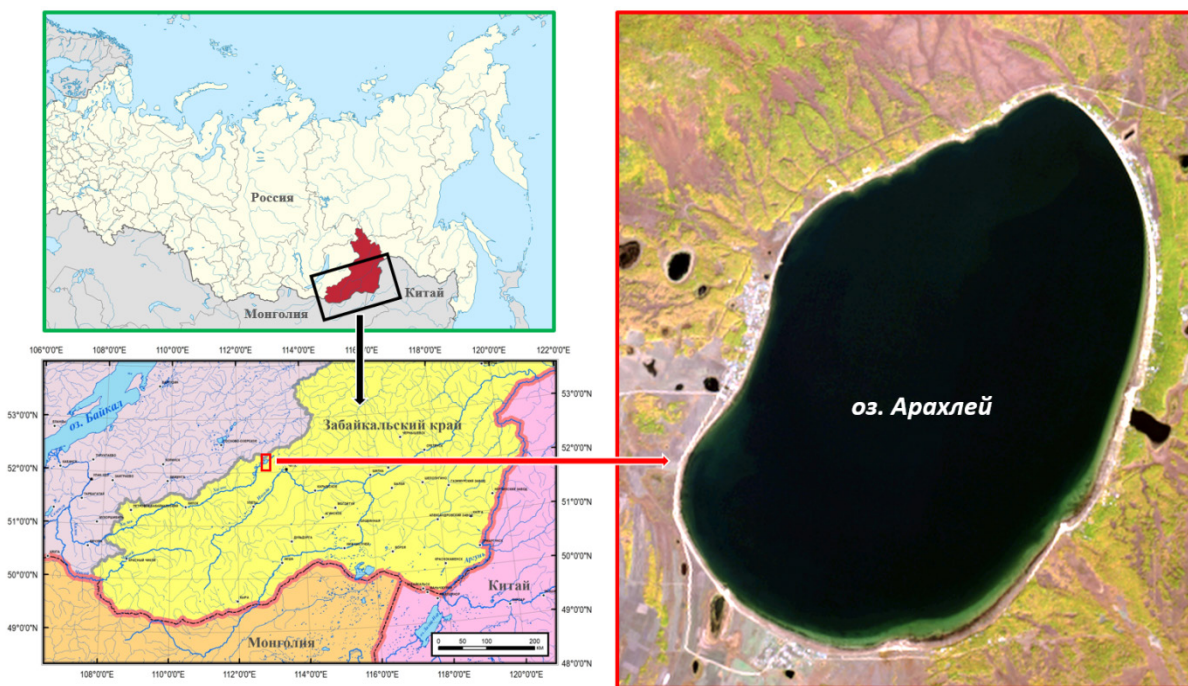


Рис. 2. Схема расположения оз. Арахлей
 Fig. 2. The layout of the lake Arakhley

Для исследования изменения площадей водного зеркала озера Арахлей использовались 93 космических снимка серии Landsat (TM, ETM+, OLI), первого уровня обработки Level 1 за период 1987–2018 гг., полученных с помощью сервиса EarthExplorer. Пространственное разрешение космических снимков – 30 м, временной интервал 16 суток.

На оз. Арахлей имеются режимные гидрологические наблюдения за уровнями воды, проводимые Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Для сравнительного анализа в целях проверки работы методики были выбраны данные о среднесуточных уровнях воды в озере за период с 1987 по 2018 гг., которые были усреднены ежемесячно.

Для получения цифровой модели рельефа дна были использованы данные съемок с БПЛА фирмы DJI, проведенных в 2017 г. в период минимальных за 30 лет уровней воды в оз. Арахлей.

При решении задачи перехода от площадей водоемов к отметкам водной поверхности и объемам детальности спутниковых снимков Landsat недостаточно вследствие низкого пространственного разрешения, составляющего десятки метров. С другой стороны, имея высокодетальную модель рельефа местности разрешением несколько сантиметров, построенную по данным БПЛА в период низкой водности, можно усовершенствовать и повысить качество исходной спутниковой информации. При построении высокодетальной модели рельефа предлагается использовать гибридный алгоритм совместного анализа данных, сочетающий данные дистанционного зондирования Landsat низкого пространственного разрешения и модель рельефа, полученную с БПЛА (рис. 3).

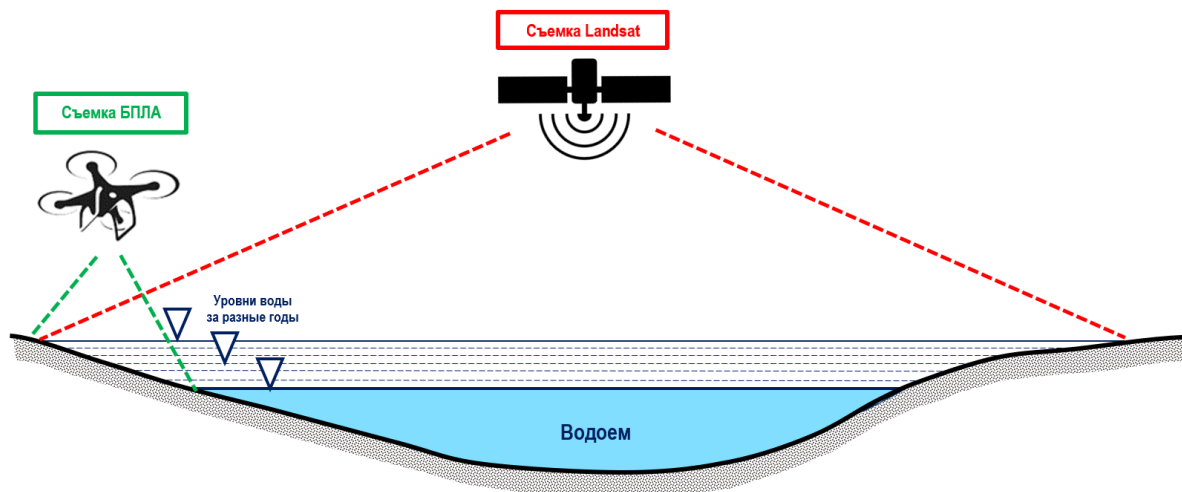


Рис. 3. Схема гибридного метода реконструкции уровней воды в водоеме
 Fig. 3. Scheme of the hybrid method for reconstructing water levels in a reservoir

Гибридный алгоритм совместного анализа данных ДЗЗ Landsat и снимков с БПЛА состоит из следующих этапов:

1. Вычисление спектральных водных индексов по данным спутникового зондирования Landsat и интерполяция полученных растров методом кубической свертки из исходного разрешения Landsat 30 м до разрешения 1 м (рис. 4). Реализация данного этапа необходима для обеспечения более плавного перехода от низкодетального спутникового снимка к высокодетальному изображению, сопоставимому с моделью рельефа БПЛА.

2. Устранение искажений геопространственной привязки, связанных со смещением интерполированного изображения внутри исходного пикселя с использованием алгоритмов компьютерного зрения OpenCV Enhanced Correlation Coefficient (ECC) Maximization [Evangelidis, Psarakis, 2008]. При работе с растром водной поверхности, дешифрованной с использованием спектрального водного индекса, полученным в результате интерполяции, точности исходной привязки Landsat (30 м в плане) становится недостаточно. Поэтому на данном этапе производится уточнение координат привязки раstra.

3. Построение цифровой модели рельефа высокого разрешения, полученной по данным фотограмметрической обработки снимков БПЛА.

4. Отбивка отметок уровней воды водоема, полученных с интерполированных растров спектральных водных индексов Landsat, по высокодетальной цифровой модели рельефа с БПЛА и получение срезов уровней воды по рельефу дна и береговой линии высокого пространственного разрешения (рис. 5).

5. Статистическая обработка полученных значений точек уровней воды водоема по рельефу БПЛА и получение отметок водной поверхности за годы, соответствующие реальным космическим снимкам Landsat. В качестве отметки уровня воды принимается среднее значение отметок поверхности земли, полученных за счет извлечения границы водной поверхности по высокодетальной цифровой модели рельефа.

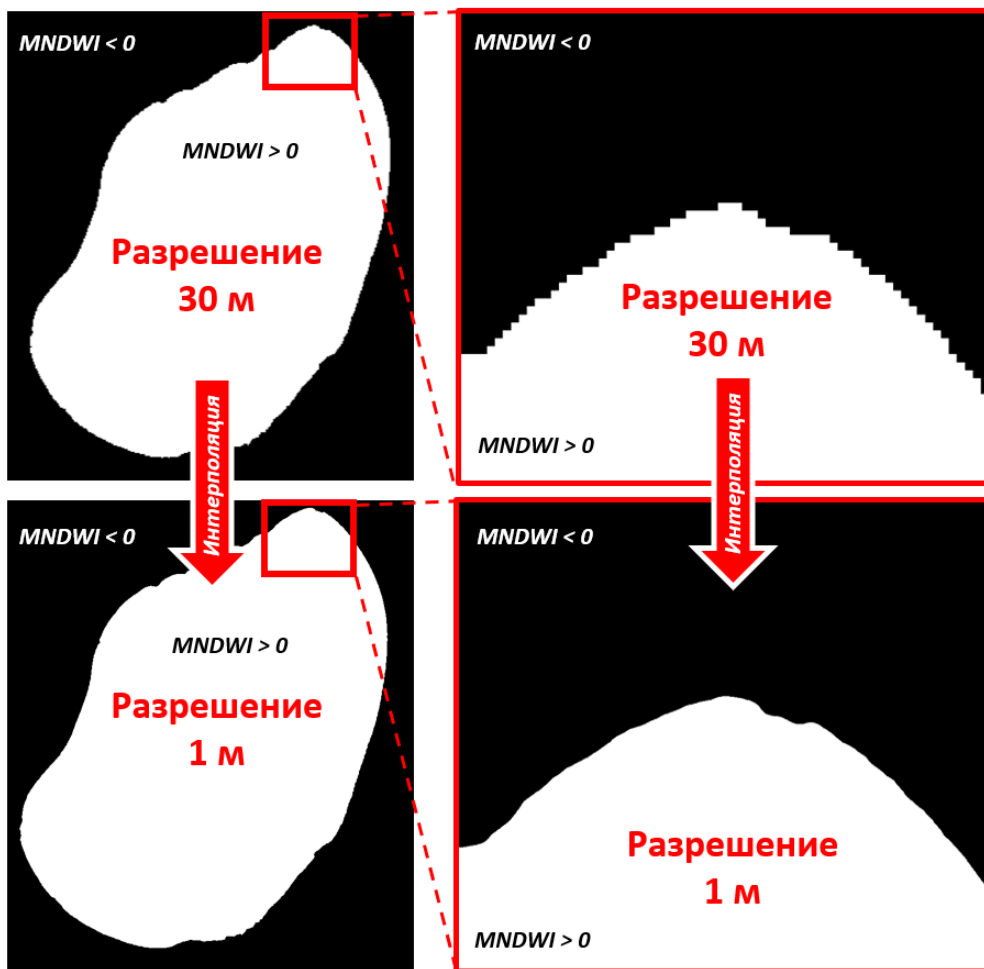


Рис. 4. Результаты пространственной интерполяции индекса Landsat MNDWI
 Fig. 4. Results of spatial interpolation of the Landsat MNDWI index

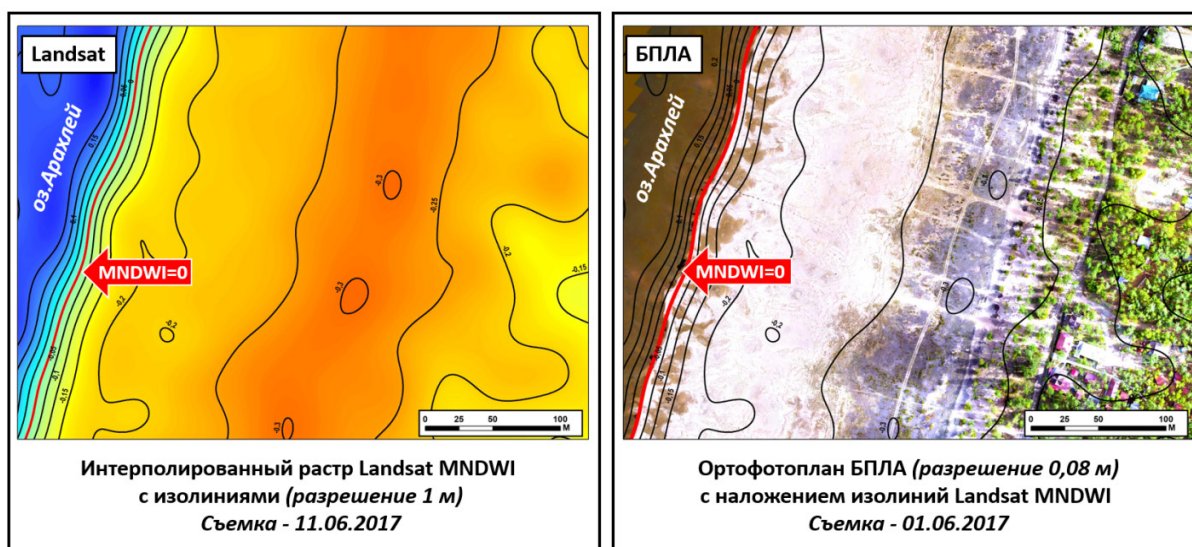


Рис. 5. Отделение поверхности воды по индексу MNDWI на близких по датам снимках с Landsat (слева) и БПЛА (справа). Красной линией обозначена линия MNDWI=0
 Fig. 5. Separation of the water surface according to the MNDWI index on images close in dates from Landsat (left) and UAV (right). The red line indicates the line MNDWI=0

Ранее было установлено, что для Забайкальского края наиболее подходящей методикой дистанционного определения площади водного зеркала водоема является применение многоканальных спектральных водных индексов по данным ДЗЗ Landsat [Курганович, Голятина, 2018]. Водные индексы использовались при исследовании озер Торейской и Ивано-Арахлейской озерных систем Забайкалья, озер степной зоны и пойменных озер бассейна трансграничной р. Аргунь [Курганович, Носкова, 2015; Голятина, 2016; Голятина, 2017; Манилюк, Маслова, 2017]. Наилучшими свойствами по дешифрированию водных поверхностей, вследствие четко выраженного порога определения, является спектральный водный индекс MNDWI, который рассчитывается по формуле (1) [Xu, 2006]:

$$MNDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{SWIR 1}}{\rho_{green} + \rho_{SWIR 1}} \quad (1)$$

где ρ_{green} и $\rho_{SWIR 1}$ – интенсивность излучения в видимом зеленом и коротковолновом инфракрасном спектральных каналах Landsat TM, ETM+, OLI.

Вычисление индекса MNDWI базируется на использовании 3 и 6 каналов Landsat 8 OLI или 2 и 5 спектральных каналов Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+. Порог разделения «вода – суша» проходит через ноль, при положительных значениях MNDWI пиксели изображения относятся к водным поверхностям (рис. 4) [Ji et al, 2009].

Используя гибридный алгоритм совместного анализа данных ДЗЗ Landsat и снимков с БПЛА, следует исходить из следующих допущений и предположений:

- наличия установившейся горизонтальной поверхности воды в водоеме во всех точках на дату съемки с космического аппарата Landsat, что позволит интерпретировать отметку уреза воды как постоянную в конкретный день по всей его акватории;

- плавного изменения характеристики MNDWI внутри смешанных пикселей изображения на границе «вода – суша», что позволит интерполировать растры MNDWI со стандартного разрешения Landsat 30 м до более высоких пространственных разрешений без существенного ухудшения данных;

- возможности проведения съемки берега с использованием БПЛА в период низкой водности с обнажившейся частью рельефа дна и береговой линии.

Обработка данных, полученных с БПЛА

Для получения высокодетальной цифровой модели рельефа дна и береговой линии исследуемого в данной статье озера Арахлей было произведено предварительное пространственное координирование участка с привязкой к существующим пунктам плановой и высотной геодезической сети. Топографо-геодезическая съемка рассматриваемого участка выполнялась с использованием GNSS комплекта Trimble R8s+R10 с постобработкой на TrimbleBusinessCenter.

В целях выполнения фотоснимков использован БПЛА фирмы DJI, оснащенный фотокамерой и позволяющий получить серию изображений, которые затем подверглись обработке и фотограмметрическому анализу с использованием метода StructurefromMotion [Westoby et al., 2012]. На исследуемом оз. Арахлей было произведено три запуска БПЛА в западной, восточной и южной частях озера в местах с наименьшей изрезанностью береговой линии (рис. 6).

Полеты аппарата были запрограммированы с использованием Pix4D Capture и Ctrl+DJI для обеспечения полного покрытия изучаемой местности на высоте 200 м, скоростью полета 6 м/с и автоматическим выполнением фотографий каждые 2 с. Во время съемки автоматически фиксировалось положение летательного аппарата, и его координаты записывались в *exif*-тег цифрового изображения с использованием бортового устройства GPS [Курганович и др., 2020].

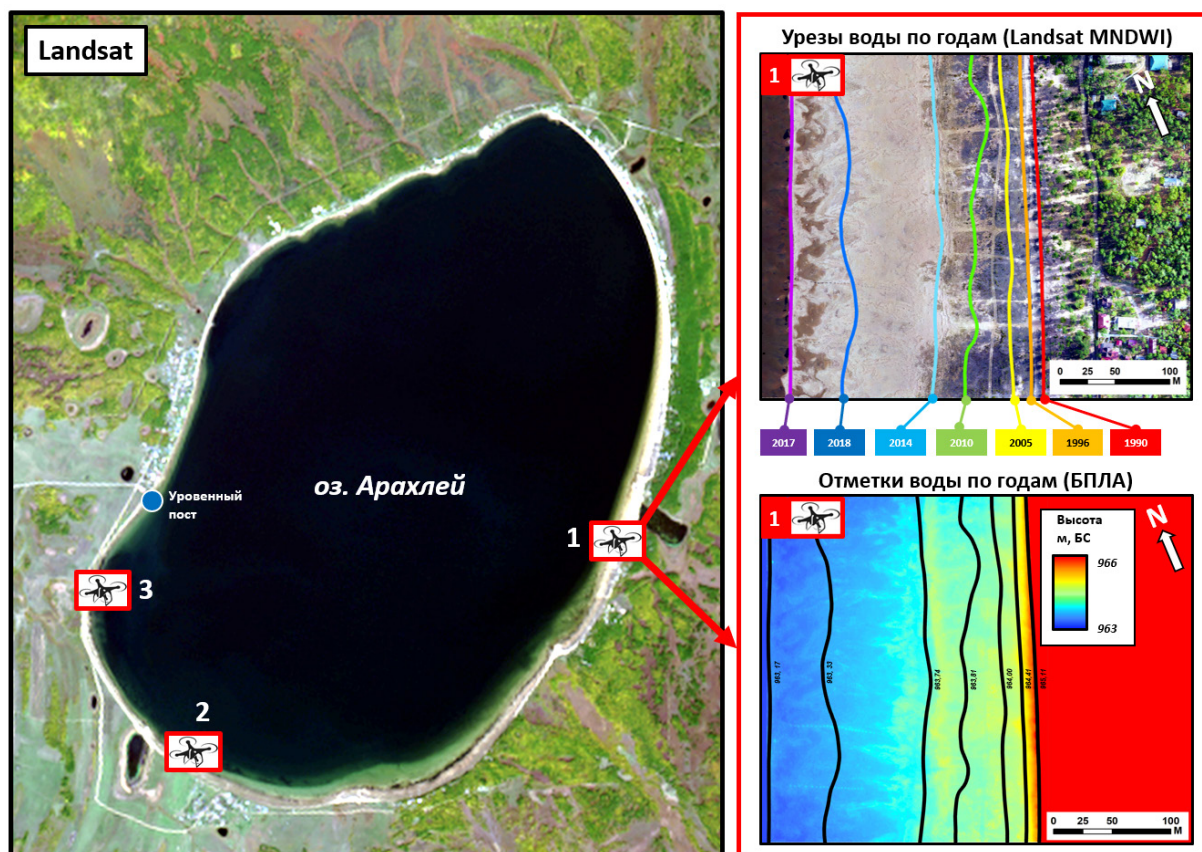


Рис. 6. Изменение площади водного зеркала оз. Арахлей за разные годы
 Fig. 6. Change in the area of the water surface of the lake Arakhley for different years

В серии изображений, полученных с БПЛА на начальном этапе, была устранена дисторсия линзы фотокамеры в AdobeLightroom. Фотограмметрическая обработка снимков производилась с использованием AgisoftPhotoscan, в результате чего была сгенерирована цифровая модель рельефа с разрешением 0,3 м и получены ортотрансформированные изображения исследуемой поверхности с разрешением 0,08 м.

Статистическая обработка результатов

На полученную высокодетальную цифровую модель рельефа дна и береговой линии оз. Арахлей был наложен интерполированный растр LandsatMNDWI с разрешением 1 м. На пересечении дешифрованной водной поверхности и рельефа полученные точки срезов уровней воды были обработаны с выделением отметок, попадающих в диапазон от 20-го до 80-го перцентиля. Это позволило произвести фильтрацию модели рельефа и устранить точки с большим перепадом высот (рис. 4). Оставшиеся отметки поверхности воды были усреднены; для оценки разброса усредняемых отметок было определено среднееквадратическое отклонение (СКО).

Оценка среднееквадратичной ошибки (RMSE) предсказанных значений уровней воды в исследуемом озере по используемой методике в сравнении с данными режимных наблюдений гидрологического поста сети Росгидромета производилась по формуле:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

где y_i – предсказанное значение уровня воды по данным ДЗЗ;
 \hat{y}_i – данные режимных наблюдений гидрологического поста сети Росгидромета на оз. Арахлей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обработки спутниковых данных Landsat были получены значения площадей водного зеркала оз. Арахлей за период 1987–2018 гг., а по результатам реализации гибридного алгоритма были извлечены уровни воды в озере по датам съемки, соответствующие площадям (рис. 7). Отмечено, что озеро подвержено значительным по отношению к его максимальной глубине колебаниям уровня воды за рассматриваемый период – от максимального уровня в 1990 г. до минимального в 2017 г. амплитуда составляет 2,52 м.

При рассмотрении разброса точек границы водной поверхности за разные годы, принимаемых для получения значений уровня воды в озере, среднее квадратическое отклонение (СКО) отметок водной поверхности за разные годы изменяется от 0,002 до 0,39 м и зависит от величины уровня воды в озере (чем выше уровень, тем выше СКО, рис. 7). Это связано с формой прибрежной поверхности, т.к. в областях с низкими отметками, чаще затопляемых водой, поверхность дна более гладкая и дает меньший разброс отметок, чем в тех областях, в которые вода поступает редко. В качестве дополнительных источников погрешностей определения отметок уреза воды в озере можно отметить ветровой нагон воды, в результате чего поверхность в разных частях озера может отклоняться от горизонтального положения и находиться на разных отметках. При выборе квадрата съемки с БПЛА и последующего анализа уровней воды на точность определения отметок водной поверхности может влиять изрезанность береговой линии, что может дополнительно привести к возникновению ошибки при интерполяции растра MNDWI с разрешения 30 м до 1 м. Также возможные погрешности может вносить детальность съемки рельефа берега озера, который используется для целей отдыха, а также может подвергаться механическому воздействию от проезда транспорта и выпаса скота.

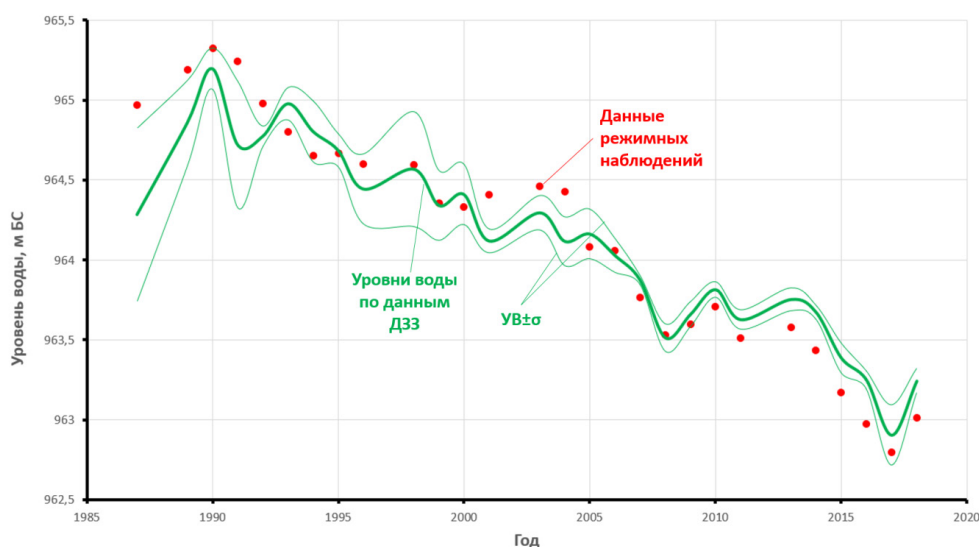


Рис. 7. Изменение уровней воды оз. Арахлей за период 1987–2018 гг. по предлагаемой методике (зеленый цвет) в сравнении с данными режимных наблюдений сети Росгидромета (красный цвет).

Тонкой линией обозначены СКО

Fig. 7. Changes in water levels of the lake Arakhley for the period 1987–2018 according to the proposed method (green color) in comparison with the data of regime observations of the Roshydromet network (red color).

The thin line indicates RMSE

Среднеквадратичная ошибка определения уровней воды составила 0,23 м, что ниже, чем горизонтальное разрешение модели рельефа (0,3 м), полученной по данным БПЛА. Соотношение уровней воды и площади водной поверхности для изменяемой части

оз. Арахлей за период 1987–2018 гг. имеет нелинейную форму (рис. 8), коэффициент детерминации составляет около 0,98.

При переходе к характеристике объема водной массы озера, вычисленной по гибриднему методу совместного анализа данных спутникового зондирования Landsat и беспилотных летательных аппаратов, следует учитывать, что измерения возможны только для изменяемой части объема озера. Поэтому для оценки выбирается некоторый сравнительный уровень, соответствующий минимально наблюдаемому за изучаемый период уровню воды, от которого впоследствии отсчитывается объем водной массы. Для оз. Арахлей был выбран минимально наблюдаемый среднегодовой уровень 962,90 м БС, соответствующий минимальному по водности 2017 г. (рис. 9, 10).

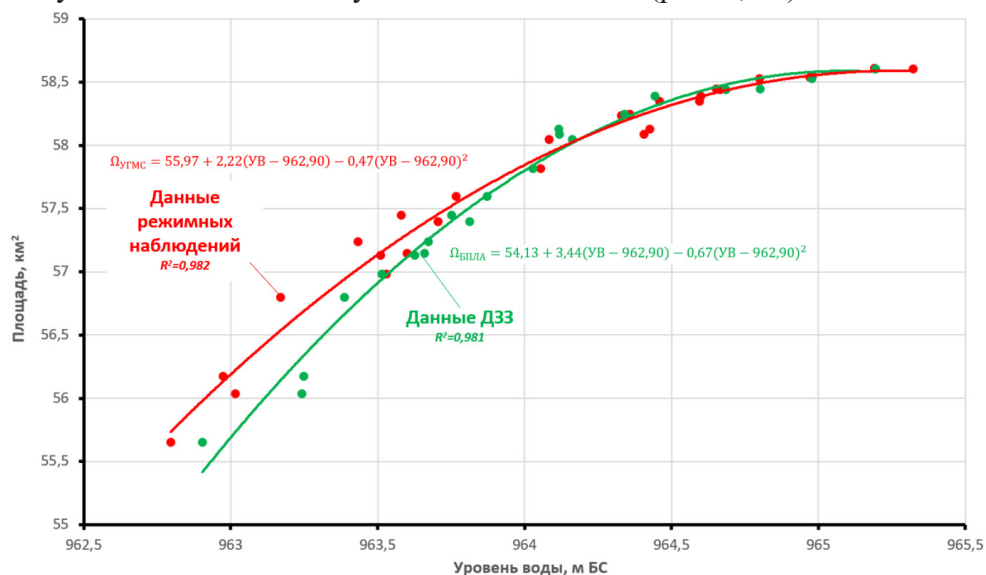


Рис. 8. Соотношение $\Omega = f(\text{УВ})$ между площадью и уровнем воды оз. Арахлей за период 1987–2018 гг., полученное по данным режимных наблюдений и данным ДЗЗ
 Fig. 8. The ratio $\Omega = f(\text{HC})$ between the area and the water level of the lake Arakhley for the period 1987–2018, obtained from regime observations and remote sensing data

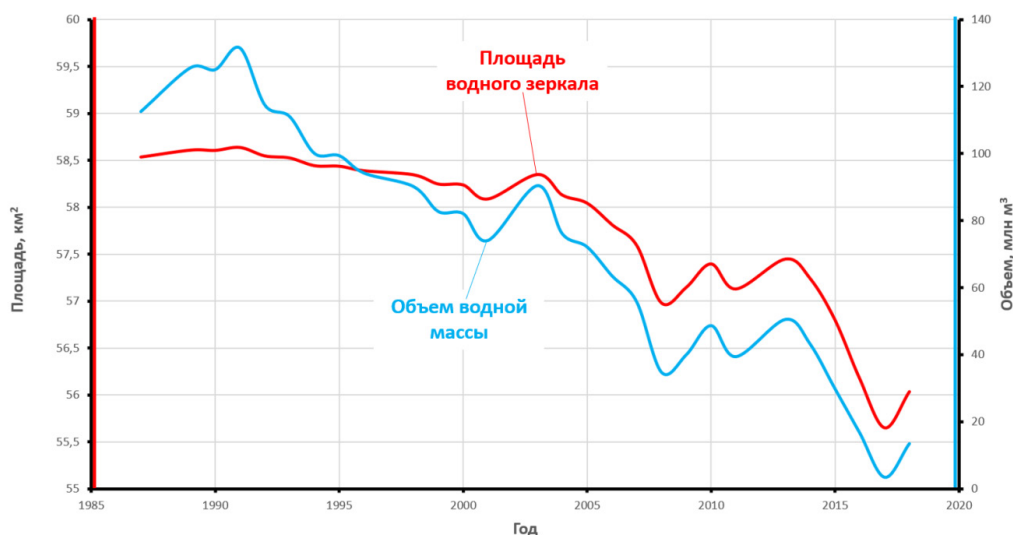


Рис. 9. Графики изменения морфометрических характеристик оз. Арахлей за период 1986–2018 гг. (площади водного зеркала и объема водной массы, отсчитанной от уровня УВ=962,90 м БС), полученные по данным ДЗЗ
 Fig. 9. Graphs of changes in the morphometric characteristics of the lake Arakhley for the period 1986–2018 (area of the water table and the volume of the water mass, counted from the level of SW = 962.90 m BS), obtained from remote sensing data

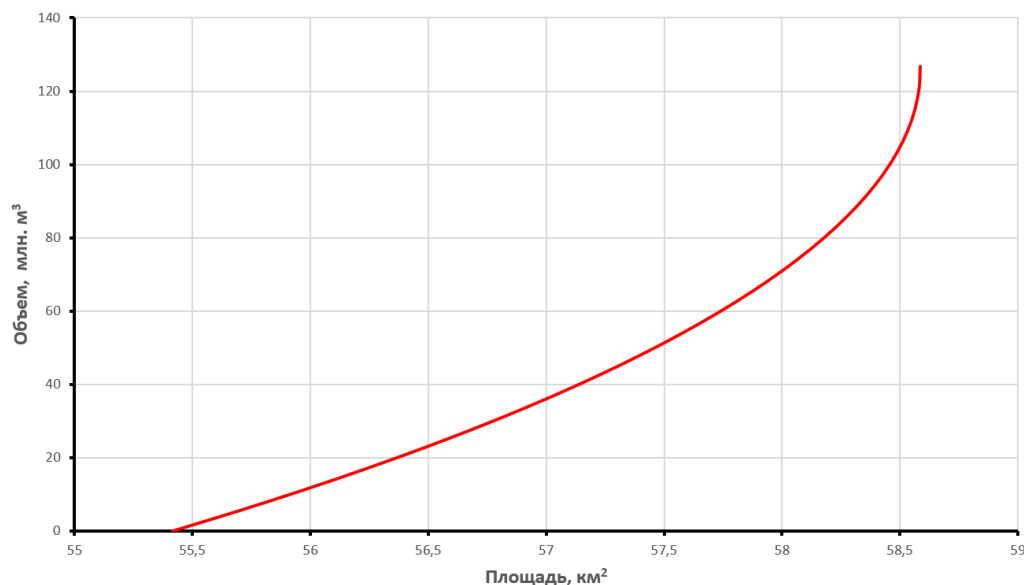


Рис. 10. Соотношение морфометрических характеристик оз. Арахлей (площади водного зеркала и объема водной массы, отсчитанной от уровня УВ=962,90 м БС), полученные по данным ДЗЗ

Fig. 10. The ratio of morphometric characteristics of the lake Arakhley (area of the water table and the volume of the water mass, counted from the level of SW = 962.90 m BS), obtained from remote sensing data

Получение временных рядов изменения объемов водной массы озера является полезным для выявления отклика водных объектов на изменение климатических характеристик. Таким образом, использование предложенного гибридного метода реконструкции уровней воды на примере озера Арахлей позволяет получить ретроспективные оценки колебаний водности водоема и вывести зависимости основных морфометрических характеристик озера, таких как площадь водного зеркала, уровень воды и объем водной массы.

ВЫВОДЫ

Использование рассмотренной в статье методики позволит решить проблему недостаточности или полного отсутствия данных о многолетнем водном режиме неисследованных озер и водохранилищ за счет совместной обработки низкодетальной спутниковой информации и высокодетальных данных с БПЛА. Оценка возможностей применения данной технологии за счет сравнения с инструментально полученными характеристиками уровней воды на режимном пункте гидрологических наблюдений показывает границы её использования, преимущества и недостатки. При этом главным преимуществом можно признать возможность получить временные ряды изменения уровней и объемов за прошлые годы в тех озерах и водохранилищах, где режимных наземных наблюдений не было никогда и вряд ли они когда-то будут. Такие сведения можно получить по проекции уреза воды водоема, полученного с космического снимка, на рельеф дна, извлеченный по данным однократной съемки с БПЛА. В случае установления зависимостей объемов водной массы от площадей водной поверхности появляется возможность производить оперативный гидрологический мониторинг водоемов, используя только спутниковые снимки Landsat.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Забайкальского государственного университета, грант № 345-ГР 122031400091-7.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by Transbaikal State University, grant No. 345-GR 122031400091-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голятина М.А.* Оценка изменения морфометрических характеристик степных озер Юго-востока Забайкалья с использованием данных дистанционного зондирования земли. Записки Забайкальского отделения Русского географического общества. Чита: ЗабГУ, 2016. С. 68–75.
2. *Голятина М.А., Курганович К.А.* Оценка изменения площадей водной поверхности Ивано-Арахлейских озер Забайкалья по данным дистанционного зондирования. Вестник Забайкальского государственного университета, 2017. Т. 23. № 6. С. 4–12.
3. *Им С.Т., Харук В.И., Ракитянская Н.М., Гоюков А.С.* Климатогенная динамика озер в экотоне лесостепи Забайкалья. Сибирский экологический журнал, 2015. Т. 22. № 6. С. 823–831.
4. *Колмакова М.В., Захарова Е.А., Кураев А.В., Земцов В.А., Курпотин С.Н.* Временная изменчивость климата и обводненности территории Западной Сибири по данным метеорологических станций, модельного реанализа и спутниковой альтиметрии. Вестник Томского государственного университета, 2012. № 364. С. 173–180.
5. *Курганович К.А., Босов М.А.* Использование гибридного метода анализа данных спутникового мониторинга и беспилотных летательных аппаратов для выделения зон затопления населённых пунктов. Образование в области безопасности жизнедеятельности и новых технологий: проблемы и перспективы развития. Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Чита: Забайкальский государственный университет, 2018. С. 66–69.
6. *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.
7. *Курганович К.А., Шаликовский А.В., Босов М.А., Кочев Д.В.* Использование беспилотных летательных аппаратов для мониторинга состояния бесхозных противопаводковых гидротехнических сооружений Забайкальского края. Гидросфера. Опасные процессы и явления, 2020. Т. 2. № 1. С. 32–43.
8. *Лебедев С.А.* Динамика Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. Т. 12. № 4. С. 72–85.
9. *Лебедев С.А.* Спутниковая альтиметрия в науках о Земле. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т. 10. № 3. С. 33–49.
10. *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.
11. *Обязов В.А.* Гидрологический режим озер Забайкалья в условиях меняющегося климата (на примере Ивано-Арахлейских озер). Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2011. № 3. С. 4–14.
12. *Троицкая Ю.И., Рыбушкина Г.В., Соустова И.А., Баландина Г.Н., Лебедев С.А., Костяной А.Г., Панютин А.А., Филина Л.В.* Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов. Водные ресурсы, 2012. Т. 39. № 2. С. 169.
13. *Шаликовский А.В., Заслоновский В.Н., Курганович К.А., Босов М.А., Солодухин А.А., Шаликовский Д.А.* Современная ситуация на пограничном участке реки Аргунь. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2018. № 2. С. 4–18.
14. *Chipman J.W.* A multisensor approach to satellite monitoring of trends in lake area, water level, and volume. Remote Sensing, 2019. No. 11 (2). P. 158. DOI: 10.3390/rs11020158.

15. *Evangelidis G.D., Psarakis E.Z.* Parametric Image Alignment using Enhanced Correlation Coefficient Maximization. *IEEE Transaction on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2008. V. 30. No. 10. P. 1858–1865.
16. *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, 140. P. 23–35.
17. *Gao B.C.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996. No. 58. P. 257–266.
18. *Ji L., Zhang L., Wylie B.* Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009. No. 75. P. 1307–1317.
19. *Lacaux, J.P., Tourre Y.M., Vignolles C., Ndione J.A., Lafaye M.* Classification of Ponds from High-Spatial Resolution Remote Sensing: Application to Rift Valley Fever Epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 2006. No. 106 (1). P. 66–74. DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.012.
20. *Morriss B., Hawley R., Chipman J., Andrews L., Catania G., Hoffman M., Lüthi P., Neumann T.* A ten-year record of supraglacial lake evolution and rapid drainage in West Greenland using an automated processing algorithm for multispectral imagery. *Cryosphere*, 2013. No. 7. P.1869–1877.
21. *Nan Xu, Yue Ma, Wenhao Zhang, Xiao Hua Wang, Fanlin Yang, Dianpeng Su.* Monitoring Annual Changes of Lake Water Levels and Volumes over 1984–2018 Using Landsat Imagery and ICESat-2 Data. *Remote Sensing*, 2020. No. 12. P. 4004. DOI :10.3390/rs1223400.
22. *Wang X., Cheng X., Gong P., Huang H., Li Z., Li X.* Earth science applications of ICESat/GLAS: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 2011. No. 32. P. 8837–8864.
23. *Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M.* ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 2012. V. 179. P. 300–314. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
24. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006. No. 27. P. 3025–3033.

REFERENCES

1. *Chipman J.W.* A multisensor approach to satellite monitoring of trends in lake area, water level, and volume. *Remote Sensing*, 2019. No. 11 (2). P. 158. DOI: 10.3390/rs11020158.
2. *Evangelidis G.D., Psarakis E.Z.* Parametric Image Alignment using Enhanced Correlation Coefficient Maximization. *IEEE Transaction on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2008. V. 30. No. 10. P. 1858–1865.
3. *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, 140. P. 23–35.
4. *Gao B.C.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996. No. 58. P. 257–266.
5. *Golyatina M.A.* Evaluation of changes in the morphometric characteristics of steppe lakes in the South-East of Transbaikalia using data from remote sensing of the earth. *Notes of the Transbaikal Branch of the Russian Geographical Society*. Chita: Transbaikal State University, 2016. P. 68–75 (in Russian).
6. *Golyatina M.A., Kurganovich K.A.* Estimation of changes in the areas of the water surface of the Ivano-Arakhlei lakes of Transbaikalia according to remote sensing data. *Bulletin of the Transbaikal State University*, 2017. V. 23. No. 6. P. 4–12 (in Russian).
7. *Im S.T., Haruk V.I., Rakityanskaya N.M., Goyukov A.S.* Climatogenic dynamics of lakes in the ecotone of the forest-steppe of Transbaikalia. *Siberian Ecological Journal*, 2015. V. 22. No. 6. P. 823–831 (in Russian).
8. *Ji L., Zhang L., Wylie B.* Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009. No. 75. P. 1307–1317.

9. *Kolmakova M.V., Zaharova E.A., Kuraev A.V., Zemcov V.A., Kirpotin S.N.* Temporal variability of climate and watering of the territory of Western Siberia according to meteorological stations, model reanalysis and satellite altimetry. *Bulletin of Tomsk State University*, 2012. No. 364. P. 173–180 (in Russian).
10. *Kurganovich K.A., Bosov M.A.* Using a hybrid method for analyzing satellite monitoring data and unmanned aerial vehicles to identify flood zones in settlements. *Education in the field of life safety and new technologies: problems and development prospects. Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference*. Chita: Transbaikalian State University, 2018. P. 66–69 (in Russian).
11. *Kurganovich K.A., Noskova E.V.* The use of water indices to assess changes in the areas of the water surface of steppe soda lakes in the South-East of Transbaikalia, according to remote sensing data. *Bulletin of the Transbaikalian State University*, 2015. No. 6 (121). P. 16–24 (in Russian).
12. *Kurganovich K.A., Shalikovskiy A.V., Bosov M.A., Kochev D.V.* The use of unmanned aerial vehicles for monitoring the state of ownerless flood control hydraulic structures in the Transbaikalian Territory. *Hydrosphere. Dangerous processes and phenomena*, 2020. V. 2. No. 1. P. 32–43 (in Russian).
13. *Lacaux, J.P., Tourre Y.M., Vignolles C., Ndione J.A., Lafaye M.* Classification of Ponds from High-Spatial Resolution Remote Sensing: Application to Rift Valley Fever Epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 2006. No. 106 (1). P. 66–74. DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.012.
14. *Lebedev S.A.* Dynamics of the Caspian Sea according to satellite altimetry data. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2015. V. 12. No. 4. P. 72–85 (in Russian).
15. *Lebedev S.A.* Satellite altimetry in geosciences. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2013. V. 10. No. 3. P. 33–49 (in Russian).
16. *Manilyuk T.A., Maslova A.V.* Investigation of water surfaces of lakes by using water indices according to remote sensing data. *Bulletin of the Transbaikalian State University*, 2017. V. 23. No. 3. P. 4–11 (in Russian).
17. *Morriss B., Hawley R., Chipman J., Andrews L., Catania G., Hoffman M., Lüthi P., Neumann T.* A ten-year record of supraglacial lake evolution and rapid drainage in West Greenland using an automated processing algorithm for multispectral imagery. *Cryosphere*, 2013. No. 7. P. 1869–1877.
18. *Nan Xu, Yue Ma, Wenhao Zhang, Xiao Hua Wang, Fanlin Yang, Dianpeng Su.* Monitoring Annual Changes of Lake Water Levels and Volumes over 1984–2018 Using Landsat Imagery and ICESat-2 Data. *Remote Sensing*, 2020. No. 12. P. 4004. DOI:10.3390/rs1223400.
19. *Obyazov V.A.* Hydrological regime of the lakes of Transbaikalia in a changing climate (on the example of the Ivano-Arakhlei lakes). *Water management in Russia: problems, technologies, management*, 2011. No. 3. P. 4–14 (in Russian).
20. *Shalikovskiy A.V., Zaslouonovskiy V.N., Kurganovich K.A., Bosov M.A., Soloduhin A.A., Shalikovskiy D.A.* A current situation on the border section of the Argun River. *Water management in Russia: problems, technologies, management*, 2018. No. 2. P. 4–18 (in Russian).
21. *Troickaya Yu.I., Rybushkina G.V., Soustova I.A., Balandina G.N., Lebedev S.A., Kostyanov A.G., Panyutin A.A., Filina L.V.* Satellite altimetry of inland waters. *Water resources*, 2012. V. 39. No. 2. P. 169 (in Russian).
22. *Wang X., Cheng X., Gong P., Huang H., Li Z., Li X.* Earth science applications of ICESat/GLAS: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 2011. No. 32. P. 8837–8864.
23. *Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M.* ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 2012. V. 179. P. 300–314. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
24. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006. No. 27. P. 3025–3033.