

## УТОЧНЕНИЕ ПЛОЩАДИ ВОДНОГО ЗЕРКАЛА ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А.В. Бочаров<sup>1</sup>, М.Г. Гречушникова<sup>2</sup>, С.И. Биденко<sup>3</sup>, С.А. Лебедев<sup>4</sup>, И.Л. Григорьева<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Тверской государственный университет, факультет географии и геоэкологии, кафедра физической географии и экологии; Институт океанологии РАН, лаборатория экспериментальной физики океана

<sup>1,2</sup> Институт водных проблем РАН, Ивановская научно-исследовательская станция

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши

<sup>3</sup> АО Научно-производственное объединение «Импульс», управление инновационного развития и стратегического планирования

<sup>4</sup> Геофизический центр РАН, лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований; Майкопский государственный технологический университет, лаборатория геоинформатики, геоэкологии и рационального природопользования

<sup>5</sup> Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, лаборатория гидрологии и гидрохимии

<sup>1</sup> Ст. преподаватель, инженер, науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: bochalex@bk.ru

<sup>2</sup> Рук. науч. группы, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: allavis@mail.ru

<sup>3</sup> Гл. эксперт, д-р техн. наук; e-mail: sibidenko@mail.ru

<sup>4</sup> Гл. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук; e-mail: sergey\_a\_lebedev@mail.ru

<sup>5</sup> Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: irina\_grigorieva@list.ru

Иваньковское водохранилище – это мелководный водоем долинно-котловинного типа. Низкие берега и зарастание мелководий вызывают сложности в определении береговой линии и площади водного зеркала. В Приказе Росводресурсов от 31.05.2019 г. № 125 площадь водоема указана равной 316 км<sup>2</sup>, тогда как в более ранних публикациях приводилось значение 327 км<sup>2</sup>. Однако даже при предварительном анализе данных дистанционного зондирования (ДДЗ) фактическая площадь Иваньковского водохранилища существенно отличается от значений, упоминаемых в литературе. Работа посвящена уточнению площади водной поверхности водоема с использованием спутниковых данных. Проведена оценка имеющихся картографических материалов и ДДЗ, начиная с заполнения водохранилища по настоящее время. По ретроспективным данным установлено, что на картах первых лет после заполнения площадь водоема была существенно больше, чем на более поздних картах, на которых отмечается значительное уменьшение части Шошинского плеса, при этом изображаемая площадь водоема равна либо меньше справочных значений. По ДДЗ были установлены значения фактической современной площади водного зеркала Иваньковского водохранилища при разных уровнях воды в период отсутствия ледостава. Согласно полученным данным, фактическая площадь водоема при уровнях, близких к нормальному подпорному уровню (НПУ), в большинстве случаев находится в пределах 220–240 км<sup>2</sup>, что на 22–31% меньше, чем в интерполяционной таблице площадей зеркала Иваньковского водохранилища при разных уровнях воды, приведенной в «Правилах использования водных ресурсов Иваньковского водохранилища на р. Волге» (Приказ Росводресурсов от 31.05.2019 г. № 125). В работе приведен пример расчета эмиссии метана с водной поверхности Иваньковского водохранилища, которая по уточненной площади оказалась на 20–25% ниже.

**Ключевые слова:** границы водных объектов, уровни воды, морфометрические характеристики, Sentinel-2, Landsat-2, эмиссия метана

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.4.3

### ВВЕДЕНИЕ

Водохранилища – это географические природно-технические объекты, которые находятся в сложных и многофакторных взаимоотношениях с окружающей средой. Водохранилища различаются между собой генезисом, морфологическими, морфометрическими, гидрологическими и экологическими характеристиками. Морфометрические параметры водоема важны

для учета запасов воды, оценки испарения с поверхности водоема, в исследованиях гидродинамических, гидрофизических и гидроэкологических процессов и др. Определение фактического положения береговой линии необходимо при установлении водоохраных зон водохранилищ. Одним из актуальных современных направлений научных исследований является оценка эмиссии парниковых газов с поверхности искусствен-

ных объектов. В Российской Федерации реализуется важнейший инновационный проект государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ». Для правильного учета общей эмиссии с поверхности водоемов необходимо уточнить площадь их водной поверхности, которая может изменяться при абразии берегов, зарастании или даже несанкционированном строительстве. В рамках проекта РНФ «Разработка методики оценки эмиссии метана разнотипными водохранилищами умеренной зоны» ведется работа по расчету характерных значений удельного потока метана для морфологических районов Иваньковского водохранилища, для чего необходимо уточнить его площадь. Этот параметр также важен для определения распространения макрофитов, которые являются агентами самоочищения водоема, и донных отложений разного типа, которые аккумулируют биогенные элементы и тяжелые металлы. Для оценки аккумуляции по величине удельного накопления элементов на опытных участках необходимо знать точную площадь водоема и его морфологических частей. Многолетние исследования процессов зарастания мелководий Иваньковского водохранилища и формирования заболоченных почв из сплавин ведутся сотрудниками Иваньковской НИС ИВП РАН и ИБВВ РАН. Для определения степени зарастания Иваньковского водохранилища также важно уточнение площади его водного зеркала.

Иваньковское водохранилище расположено в Тверской и Московской областях в южной части Верхневолжской низины, находится в условиях лесной ландшафтной зоны. Образовано в 1937 г. перекрытием русла Волги плотиной у г. Дубна (ранее с. Иваньково). Иваньковское водохранилище – мелководный водоем долинно-котловинного типа,

сезонного регулирования. Сработка уровня водохранилища осуществляется с декабря до середины марта. Далее начинается наполнение водохранилища до отметки нормального подпорного уровня (НПУ). В отдельные годы при значительных объемах половодья возможна форсировка уровня.

Иваньковское водохранилище по морфологическим особенностям подразделяется на три плеса: Волжский, Шошинский и Иваньковский [Гидрометеорологический..., 1975].

Волжский плес находится в зоне переменного подпора, поэтому его размеры изменяются в зависимости от стадии наполнения водохранилища. Шошинский плес образован затоплением низменной части долины р. Шоша, он мелководный и значительно заросший водолубивой растительностью. Иваньковский плес, озеровидное расширение в долине Волги ниже впадения р. Созь, является наиболее широкой частью водохранилища, находится в постоянном подпоре от Иваньковского гидроузла [Гидрометеорологический..., 1975].

В соответствии с [Приказ..., 2019], акватория Иваньковского водохранилища по морфометрическим характеристикам и гидрологическому режиму делится на три плеса: «Верхневолжский – от города Твери до устья Шошинского плеса, имеющий форму реки; Шошинский плес – это затопленная пойма р. Шоши от ее устья до деревни Городище; Нижневолжский плес, занимающий среднюю и приплотинную части Иваньковского водохранилища». Морфометрические характеристики Иваньковского водохранилища по данным, приведенным в [Гидрометеорологический..., 1975; Иваньковское..., 1978; Экологические..., 2001] и в [Приказ..., 2019], представлены в таблице 1.

Таблица 1

### Морфометрические характеристики Иваньковского водохранилища при НПУ

| Источник | НПУ, м<br>БСВ | УМО, м<br>БСВ | ФПУ,<br>м БСВ | $F$ , км <sup>2</sup> | $W_{\text{п}}$ , км <sup>3</sup> | $W_{\text{сл}}$ , км <sup>3</sup> | $H_{\text{ср}}$ , м | $H_{\text{макс}}$ , м | $L$ , км | $B_{\text{макс}}$ , км |
|----------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|----------|------------------------|
| По [1]   | 123,89        | 119,39        | 124,09        | 327                   | 1,12                             | 0,813                             | 3,4                 | 19,0                  | 120      | 8,0                    |
| По [2]   | 123,89        | 119,39        | 124,09        | 316                   | 1,22                             | 0,813                             | 4,0                 | 19,0                  | 120      | 12,0                   |

*Примечание:* НПУ – нормальный подпорный уровень, УМО – уровень мертвого объема, ФПУ – форсированный подпорный уровень,  $F$  – площадь водного зеркала при НПУ,  $W_{\text{п}}$  – полный объем при НПУ,  $W_{\text{сл}}$  – объем сливной призмы,  $H_{\text{ср}}$  – средняя глубина,  $H_{\text{макс}}$  – максимальная глубина,  $L$  – длина,  $B_{\text{макс}}$  – наибольшая ширина.

*Источники:* 1 – по [Гидрометеорологический..., 1975; Иваньковское..., 1978; Экологические..., 2001]; 2 – по [Приказ..., 2019].

Берега Иваньковского водохранилища низкие, часто заболоченные и только в некоторых местах умеренно возвышенные, что определяет нечеткость идентификации уреза воды. Водохранилище мелководное, его средняя глубина по разным источникам равна 3,4–4 м (см. табл. 1). Площадь мелководий с

глубинами до 2 м составляет около 50% [Волга..., 1978]. Это способствовало интенсивному зарастанию в первые десятилетия после заполнения.

По данным В.А. Экзерцева [Иваньковское..., 1978], в 1957 г. прибрежно-водная растительность занимала 5465 га (16,7% от площади водоема), а в

1972 г. площадь ее составила 7633 га (23,4% от площади водохранилища). В начале 2000-х гг. площадь заросших мелководий в целом по водохранилищу оценивалась примерно в 27,5% [Григорьева, Федорова, 2010]. По исследованиям 2006 г. получено, что сплавинные комплексы заняли 23,2 км<sup>2</sup> (7,1%), а фитокомплексы – 61,1 км<sup>2</sup> (20,5%) [Тихомиров, 2010], что в целом составляет 27,6% от площади акватории. Заращение мелководий приводит к сокращению площади водного зеркала водохранилища.

Иваньковское водохранилище является одним из основных источников водоснабжения г. Москвы, около 25% стока из него поступало в канал им. Москвы [Волга..., 1978], в последние годы сток несколько уменьшился. Согласно литературным данным разных лет площадь зеркала водохранилища при НПУ (123,89 м БСВ) составляет 327 км<sup>2</sup> [Гидрометеорологический..., 1975; Иваньковское..., 1978; Экологические..., 2001]. В государственном водном реестре приведено такое же значение. Впервые эта величина была указана в отчете о строительстве канала Москва – Волга [Канал Москва – Волга, 1940]. В последних опубликованных источниках фигурирует площадь водохранилища при НПУ, равная 316 км<sup>2</sup> [Приказ..., 2019]. В ходе исследований авторами статьи было отмечено, что даже при предварительном анализе данных дистанционного зондирования (ДДЗ) фактическая площадь Иваньковского водохранилища значительно отличается от величин, упоминаемых в литературе. Цели работы – уточнение фактической площади водоема и установление причин и времени ее изменения.

Для их реализации была проведена ретроспективная оценка литературных источников и материалов ДДЗ, начиная с заполнения водохранилища (1937) по настоящее время.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подпор от Иваньковского гидроузла достигает по р. Волге города Твери, по р. Шоше распространяется на 80 км, а по р. Созь – на 30 км [Приказ..., 2019]. Исходя из вышесказанного, в данной работе в качестве границ водохранилища были использованы следующие ориентиры: по р. Волге до железнодорожного моста в г. Тверь, по р. Тверце до границы г. Твери, по р. Шоше до д. Балаково, по р. Созь до пос. 1-е Мая, по р. Сосце (р. Малая Созь) до д. Головино. Также к водохранилищу были отнесены все приустьевые заливы его остальных притоков.

Одним из первых спутниковых изображений, где Иваньковское водохранилище не сильно перекрыто облачностью, является снимок, полученный сенсором спутника Landsat-2 12 мая 1975 г. (рис. 1). На спутнике был установлен мультиспектральный сканер MSS, размер пикселя его изображения равен 57×79 м [U.S. Geological Survey..., 2024], что не позволяет определять малые водотоки и заливы. После заполнения водохранилища к этому периоду прошло более трех десятилетий, в течение этого времени береговая линия изменилась. Площадь водохранилища по данному снимку составляет 232 км<sup>2</sup>, что значительно меньше справочных данных, но близко к оценкам площади водоема по современным данным ДДЗ.

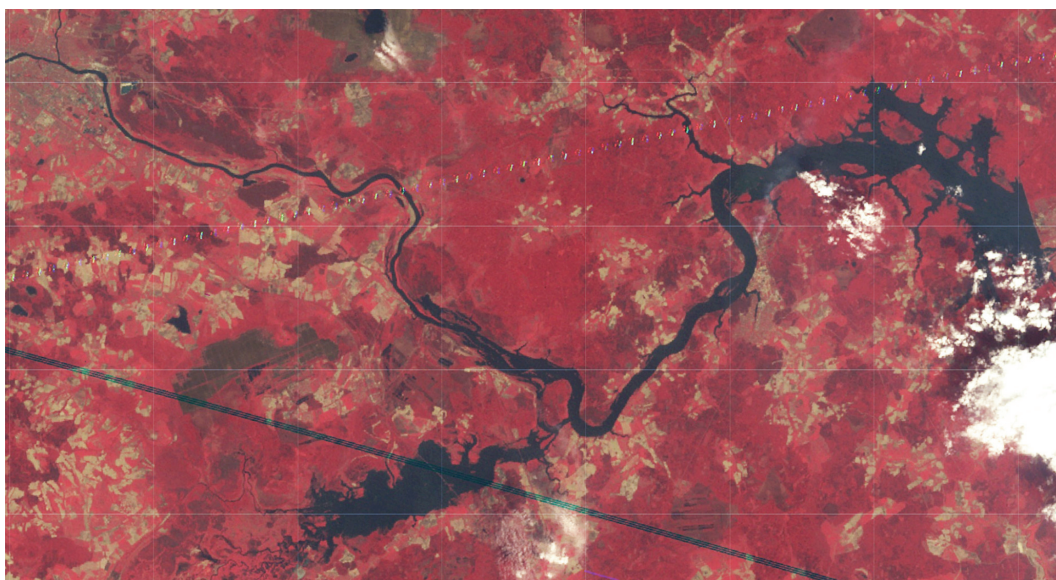


Рис. 1. Один из первых спутниковых снимков территории Иваньковского водохранилища (спутник Landsat-2, 12 мая 1975 г.). Источник: [Google Earth Engine..., 2024]

Fig. 1. One of the first satellite images of the Ivankovskoye Reservoir (Landsat-2 satellite, May 12, 1975). Source: [Google Earth Engine..., 2024]



Для оценки фактической современной площади водохранилища при НПУ спутниковые снимки последних лет были сопоставлены с уровнями водохранилища. Для установления причин несоответствия проанализированы карты первых лет существования водоема.

На картах РККА масштаба 1 : 200 000 и 1 : 500 000, выпущенных в 1941 г., границы Иваньковского водохранилища отображены более четко, чем на других картах этого периода. В работе были также рассмотрены карта Калининской области масштаба 1 : 500 000 (1937 г.) и карта-схема канала Москва – Волга масштаба 1 : 500 000 (1939 г.). Все карты были геопривязаны в ГИС, границы водоема оцифрованы ручным способом.

Из современных данных дистанционного зондирования, находящихся в открытом доступе, наилучшим пространственным разрешением обладают снимки со спутников Sentinel-2, созданные в рамках программы Copernicus, реализуемой Европейским космическим агентством. Данные получают при помощи двух идентичных спутников, находящихся на одной орбите. Первым был запущен спутник Sentinel-2A в 2015 г.,

второй Sentinel-2B в 2017 г. На обоих аппаратах установлен сенсор MSI, проводящий съемку в видимом и ближнем ИК-диапазонах с разрешением от 10 до 60 м [Sentinel-2 Mission guide, 2024].

Вначале была осуществлена оценка архива спутниковых снимков Sentinel-2 на территорию, где расположено Иваньковское водохранилище, в ходе которой отбирались малооблачные сцены. Наибольшее количество малооблачных снимков на данную территорию было получено в 2019 г. При этом их распределение по времени в течение года оказалось достаточно равномерным. Поэтому оценку современного состояния границ Иваньковского водохранилища было решено провести на основании внутригодовой изменчивости в 2019 г. В исследовании было использовано шесть снимков Sentinel-2. При обработке снимков учитывался среднесуточный уровень воды в Иваньковском водохранилище в 2019 г. (рис. 2). В данном исследовании уровень воды приводится в Балтийской системе высот (БСВ). Для получения и обработки ДДЗ использовалась платформа Google Earth Engine [Google Earth Engine, 2024].

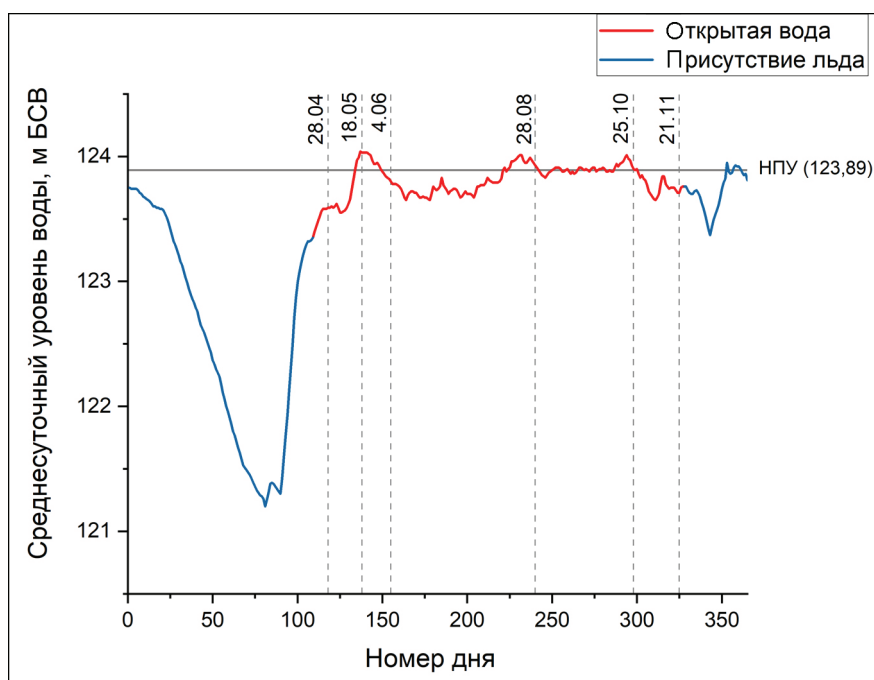


Рис. 2. График хода среднесуточного уровня воды в Иваньковском водохранилище в 2019 г.

Fig. 2. Graph of the average daily water level in the Ivankovskoye Reservoir in 2019

Для выделения водных объектов наилучшим образом подходят данные спутниковой съемки в ближнем ИК-диапазоне, так как в этой спектральной зоне имеется выраженный контраст между сухой и водной поверхностью. Известны три основных способа определения границы водного объекта

по данным ДЗЗ: визуальное дешифрирование, сегментация изображений, классификация на основе индексных изображений [Чичкова и др., 2016].

Приведенные выше методики хорошо подходят для водоемов с четкой береговой линией, но имеют существенные ограничения для исследования при-

брежной зоны. В результате экспериментальных изысканий была разработана методика, основанная на разделении пикселей ИК-канала по пороговому значению отражательной способности на группы (вода и суша) [Бочаров и др., 2021], которая показала наибольшую эффективность для определения границ водных объектов. Этот подход был использован для создания маски водоема по снимкам Sentinel-2. Расчет порогового значения между группами пикселей проводился на основе оценки профилей переходной зоны в ближнем ИК-канале.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вначале исследования был проведен анализ ретроспективных источников, который позволил предположить, что наиболее значимый вклад в неточность сведений о площади водоема связан с правобережьем верховья Шошинского плеса. На картах данной территории, созданных в первые годы

существования водохранилища, площадь водоема значительно больше (рис. 3–5). На картах, отображающих ситуацию после нескольких лет существования водохранилища, значительная часть прежде водной поверхности отмечена как заболоченные территории (рис. 6).

По карте Калининской области 1937 г. (см. рис. 3), составленной отделом землеустройства Калининского областного земельного управления, площадь водохранилища составляет 374 км<sup>2</sup>. Карта сильно генерализирована, на ней отсутствуют крупные острова. По картам РККА, отражающим состояние местности в первые годы после заполнения водохранилища (см. рис. 4), площадь водоема составляет 354 км<sup>2</sup>. На карте-схеме канала Москва – Волга в Большом советском атласе мира (см. рис. 5) Ивановское водохранилище имеет площадь 327 км<sup>2</sup>, что соответствует данным, указанным в отчете о строительстве канала [Канал Москва – Волга..., 1940].



Рис. 3. Фрагмент карты Калининской области 1937 г. (масштаб 1 : 500 000).

Источник: [Схематическая карта Калининской области..., 1937]

Fig. 3. Fragment of the map of the Kalinin region, 1937 (scale 1 : 500 000). Source: [Schematic map of the Kalinin region, 1937]

Карты РККА, отражающие состояние местности в 1940–1941 гг. (см. рис. 6), обладают более высокой детализацией границ водохранилища, при этом в верховьях Шошинского плеса исчезает затопленная часть поймы р. Инюха. Площадь водохранилища по этим картам составляет 290 км<sup>2</sup>, что уже меньше значений, приведенных в литературе. На данной карте границы водоема, в основном, соответствуют современному состоянию, однако есть участки, где водная поверхность занимает существенно больше пространства, чем сейчас. Несмотря на имеющиеся отклонения в геопривязке старой топографической карты, при сравнении границ водоема, полученных по современным спутниковым данным при НПУ, с

картой РККА 1940–1941 гг., можно отчетливо выделить четыре наиболее крупных участка, где на карте отмечена водная поверхность, а по современным ДДЗ она отсутствует. Это устье р. Тропка и заливы у о. Клиницы и о. Харпуша; устье р. Шоши и протока у о. Низовка; в верховьях Шошинского плеса; заливы в районе с. Городня и д. Видогощи.

В первые годы существования водохранилища происходили процессы формирования аквальных комплексов. В этот период вследствие ветрового волнения формировались профили подводного берегового склона, происходило зарастание и заболачивание мелководий, а также сплавинообразование и другие трансформации. Учитывая, что



Иваньковское водохранилище мелководное, эти процессы могли внести существенный вклад в изменение морфометрических параметров водоема. Не менее существенным аспектом является то, что топографическая съемка производилась не сразу, а учитывая труднодоступность заболо-

ченных берегов, не могла обладать высокой точностью. Спутниковых систем дистанционного зондирования Земли в то время еще не существовало, а детализированная аэрофотосъемка с самолетов не позволяла получить одномоментный охват территории.

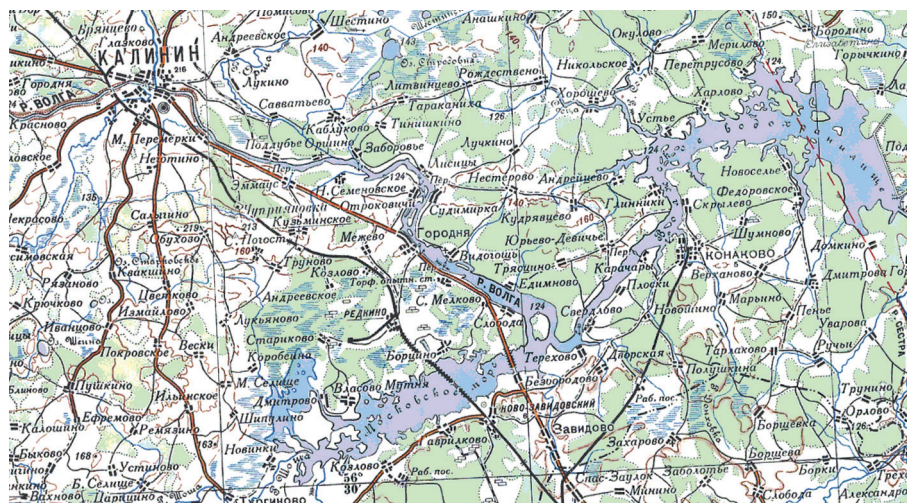


Рис. 4. Фрагмент карты РККА 1937–1941 гг. (масштаб 1 : 500 000). Источник: [Карты РККА Европейской части СССР..., 1941]

Fig. 4. Fragment of the Red Army map 1937–1941 (scale 1 : 500 000).

Source: [Maps of the Red Army of the European part of the USSR..., 1941]

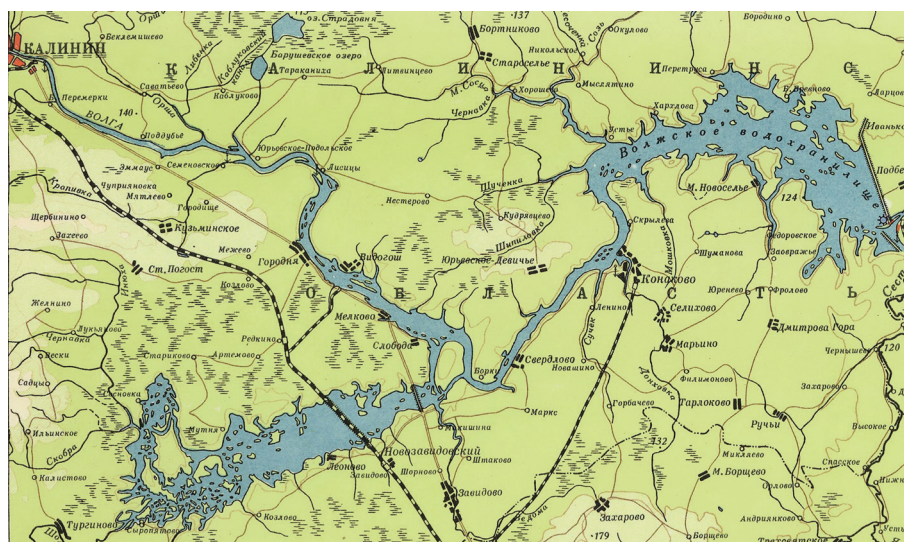


Рис. 5. Фрагмент карты-схемы канала Москва – Волга в Большом советском атласе мира 1939 г. (масштаб 1 : 500 000). Источник: [Большой советский атлас..., 1939]

Fig. 5. Fragment of the map-scheme of the Moscow – Volga Canal in the Great Soviet Atlas of the World of 1939 (scale 1 : 500 000). Source: [Great Soviet World Atlas..., 1939]

Следующим этапом нашего исследования стал анализ современных спутниковых снимков Sentinel-2 за 2019 г. Снимок Sentinel-2, полученный 28 апреля 2019 г., был сделан в начале безледостановного периода при уровне воды ниже НПУ (123,59 м БСВ на посту в г. Дубна). В этот период происходит заполнение водохранилища после сброса воды пе-

ред весенним половодьем. На данном снимке площадь водного зеркала Иваньковского водохранилища составляет 235,2 км<sup>2</sup>.

В начале мая 2019 г. продолжалось интенсивное заполнение водохранилища. К середине мая уровень воды поднялся выше НПУ (124,03 м БСВ – 17 мая). По снимку Sentinel-2, произведенному



18 мая 2019 г., площадь Иваньковского водохранилища составила 238,8 км<sup>2</sup>. Следует отметить, что в весенний период определению точных границ водоема не препятствовало сезонное зарастание акватории воздушно-водной растительностью.

В конце мая 2019 г. уровень воды начал снижаться, и к началу июня он опустился ниже НПУ. По снимку Sentinel-2, произведенному 6 июня 2019 г. при уровне воды 123,80 м БСВ, площадь Иваньковского водохранилища составляла 229,5 км<sup>2</sup>.

В июне и июле уровень воды находился незна-

чительно ниже НПУ, в это время происходит интенсивное зарастание акватории прибрежной водной растительностью. К концу августа 2019 г. уровень воды несколько повысился (до 123,93 м БСВ – 28 августа), что незначительно выше НПУ. По снимку Sentinel-2 от 28 августа 2019 г. площадь Иваньковского водохранилища составила 224,4 км<sup>2</sup>. В этот период на акватории наблюдался пик развития макрокфитов. Относительно майских данных площадь водной поверхности сократилась на 14,4 км<sup>2</sup> (6,4%), но уровень воды был ниже майского на 10 см.



Рис. 6. Фрагмент карты РККА 1940–1941 гг. (масштаб 1 : 200 000).

Источник: [Карты РККА Валдайской возвышенности..., 1941]

Fig. 6. Fragment of the Red Army map 1940–1941 (scale 1 : 200 000).

Source: [Map of the Red Army of the Valdai Hills..., 1941]

В сентябре и октябре 2019 г. уровень Иваньковского водохранилища был близок к НПУ (25 октября 2019 г. он равнялся 123,90 м БСВ), а площадь водохранилища, по снимкам с Sentinel-2, составила 218,2 км<sup>2</sup>. Следует отметить, что по осенним снимкам четкость разделения суши и водной поверхности снижается.

В ноябре 2019 г. уровень водохранилища опустился немного ниже НПУ. В это время в акватории имелось большое количество увядающей воздушно-водной растительности, а на берегу происходило отмирание прибрежно-водной растительности. Коэффициент отражения растительности в ближнем ИК-диапазоне снижался, различие спектральных свойств между суши и водой уменьшилось. Некоторые темные объекты могут ложно дешифроваться как водная поверхность. Также следует заметить, что уменьшался угол падения солнечных лучей, тени деревьев становились больше, а они также могут быть ложно определены как водные объекты. Приведенные факторы могут быть при-

чиной несколько завышенной площади водных объектов. По снимку Sentinel-2 от 21 ноября 2019 г., площадь водохранилища составила 227,9 км<sup>2</sup>. Среднесуточный уровень воды на посту в г. Дубна в этот день был равен 123,5 м БСВ, но в то же время уклон водной поверхности относительно поста в г. Твери был выше обычного (табл. 2).

Приказ Росводресурсов от 31.05.2019 № 125 «Об утверждении Правил использования водных ресурсов Иваньковского водохранилища на р. Волге» [Приказ..., 2019] содержит интерполяционную таблицу площадей зеркала Иваньковского водохранилища при разных уровнях воды. При сравнении полученной авторами площади водоема со значениями, приводимыми в приказе (см. табл. 2) видно, что площадь водоема, по данным ДЗЗ, меньше указанных в приказе значений на 22–31%.

В ходе оцифровки карт установлено, что на карте-схеме канала Москва – Волга в Большом советском атласе мира (см. рис. 5) площадь водоема равна 327 км<sup>2</sup>, что совпадает с официальными дан-

ными. Для выявления несоответствия границ водохранилища по карте-схеме канала Москва – Волга с современными ДДЗ был использован спутниковый снимок Sentinel-2, полученный 28 августа 2019 г. при уровне, близком к НПУ, при обработке которого

площадь Иваньковского водохранилища составила 224,4 км<sup>2</sup> (рис. 7). Максимальные несоответствия границ водоема обнаружены в верховьях Шошинского плеса, на правом берегу Иваньковского плеса, и в средней части Волжского плеса.

Таблица 2

### Уровень воды и площадь водного зеркала Иваньковского водохранилища по снимкам Sentinel-2

| Дата       | Уровень Дубна, м БСВ | Уровень Тверь, м БСВ | Площадь по [Приказ..., 2019], км <sup>2</sup> | Фактическая площадь по данным Sentinel-2, км <sup>2</sup> |
|------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 28.04.2019 | 123,59               | 123,63               | 302,44                                        | 235,2                                                     |
| 18.05.2019 | 124,03               | 124,04               | 327,47                                        | 238,8                                                     |
| 04.06.2019 | 123,80               | 123,81               | 311,46                                        | 229,5                                                     |
| 28.08.2019 | 123,93               | 123,97               | 319,29                                        | 224,4                                                     |
| 25.10.2019 | 123,90               | 123,99               | 316,84                                        | 218,2                                                     |
| 21.11.2019 | 123,71               | 123,86               | 306,74                                        | 227,9                                                     |

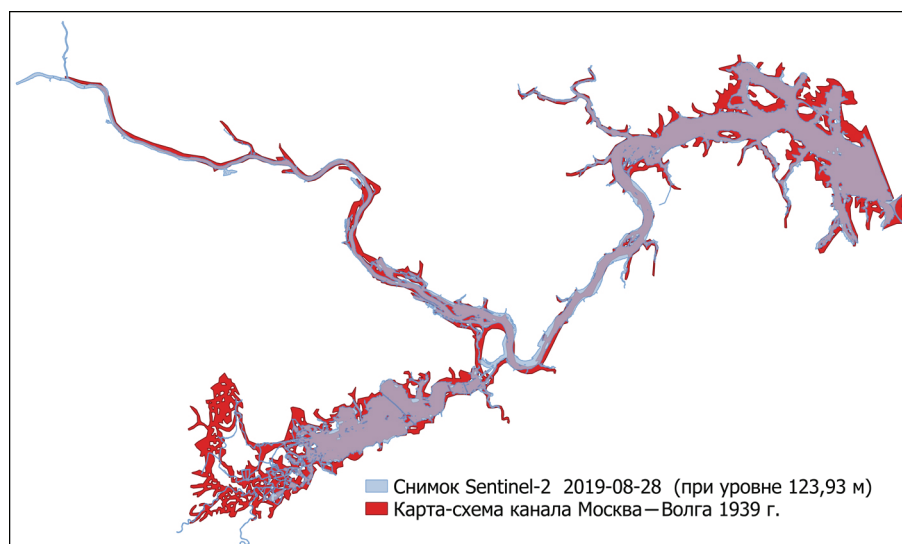


Рис. 7. Сопоставление границ Иваньковского водохранилища на карте-схеме канала Москва – Волга с границами, полученными по данным Sentinel-2

Fig. 7. Comparison of the boundaries of the Ivankovskoye Reservoir on the map-scheme of the Moscow – Volga Canal with the boundaries obtained from Sentinel-2 data

Отдельно был проведен учет полигонов водных объектов, не соединенных с водоемом, но по морфометрическим признакам дешифрируемых как старицы, вероятно отделенные вследствие зарастания и, возможно, имеющие связь с основной акваторией водохранилища в периоды повышения уровня воды либо соединенные недешифрируемыми протоками. Наибольшее количество подобных объектов находится в верховьях Шошинского плеса. По снимку Sentinel-2, произведенному 18 мая 2019 г., площадь всех подобных водных объектов не превышает 5 км<sup>2</sup>, поэтому существенного вклада в изменение

площади водного зеркала Иваньковского водохранилища эти объекты не вносят. В любом случае фактическая площадь водохранилища значительно меньше значений, приведенных в [Приказ, 2019].

Максимальный проектный уровень при пропуске максимальных расходов воды вероятностью превышения 0,1% равен 124,19 м БСВ. Используя модель рельефа Copernicus DEM GLO-30 [Copernicus DEM..., 2024], было смоделировано подтопление территории при повышении до максимального проектного уровня, при нулевом уклоне водной поверхности. Для увеличения максимально неопровержи-



мой площади водохранилища был проведен учет локальных понижений поблизости. Максимальная площадь водоема при этом составила 276 км<sup>2</sup>.

Согласно данным [Приказ..., 2019], при пропуске максимальных расходов воды уровень воды в верховье Шошинского плеса может подниматься до 126 м, а в верховье Волжского плеса до 130 м. При возникновении таких ситуаций будут происходить существенные подтопления в верховьях Шошинского плеса, а также менее значительные подтопления в среднем течении Волжского плеса и в устье р. Шоши. Определение площади затопления при пропуске максимальных расходов воды в данной работе не проводилось и будет являться предметом дальнейших исследований.

По данным наших исследований, площадь водохранилища, приводимая в литературе, не соответствует фактической, что влечет за собой изменения в расчете компонентов водного баланса. Меньшая площадь и соответственно объем водоема требуют более внимательного отношения к вопросам природопользования в бассейне водохранилища, так как способность к самовосстановлению и степень устойчивости к предельным нагрузкам у аквальных комплексов водоема будет ниже. Уточнение морфометрических характеристик Иваньковского водохранилища необходимы для планирования природоохранных мероприятий для стабилизации и улучшения экологического состояния водоема, испытывающего в настоящее время значительное антропогенное воздействие.

В качестве примера важности правильного определения площади водоема приведем следующий расчет. В 2020–2022 гг. были измерены удельные потоки метана в различных районах водохранилища [Гречушникова и др., 2024]. Для простейшей оценки суммарной эмиссии в день проведения съемки осредним эти значения и получим 19,9, 133,8 и 48,9 мгС/(м<sup>2</sup>·сут.) соответственно. С учетом уровня воды в день съемки (123,98, 123,83 и 123,46 м БСВ соответственно) с использованием данных о батиметрической кривой из Приложения 13 к Правилам использования водных ресурсов Иваньковского водохранилища на р. Волге, утвержденным приказом Росводресурсов от 31 мая 2019 г. № 125 (322, 313 и 301,3 км<sup>2</sup> соответственно), то получим, что эмиссия в дни съемки составляла 6,4, 41,9 и 14,7 тС/сут. соответственно. Если произвести расчет эмиссии при площади 240 км<sup>2</sup>, то ее значения составят 4,8, 32,1 и 11,7 тС/сут. соответственно, что на 20–25% меньше. Такая разница является весьма существенной при оценке выхода парниковых газов с поверхности, занятой водохранилищем, что указывает на важность точного определения его площади.

## ВЫВОДЫ

Анализ карт, изданных в первые годы после создания Иваньковского водохранилища, показал, что на них границы водохранилища сильно генерализованы и отличаются значительной изменчивостью расположения. Авторы предполагают, что в существенной степени это обусловлено не зарастанием, а недостаточным обследованием водоема. Наиболее сильные изменения происходят на картах в период с 1937 по 1940–1941 гг., в первую очередь они связаны с уменьшением площади Шошинского плеса. На картах, отражающих состояние местности после 1940–1941 гг., площадь водохранилища значительно меньше, чем в официальных источниках.

Одним из первых спутниковых изображений Иваньковского водохранилища является снимок, полученный сенсором спутника Landsat-2 в 1975 г., и с этого периода его площадь не претерпела значительных изменений. Сравнительный анализ спутниковых снимков 1975 и 2019 гг. показал, что фактическая площадь водного зеркала Иваньковского водохранилища на 22–33% меньше значений, приводимых в литературе и в [Приказ..., 2019]. Оценка площади водоема по снимкам других лет подтвердила полученные результаты.

Авторы не ставили задачу установления площади водного зеркала в первые годы существования водоема, но предполагают, что она была меньше официальных данных. В дальнейшем произошло ее сокращение по причине интенсивного зарастания в первые десятилетия после заполнения водохранилища. Следует учитывать, что приводимые в других исследованиях площади зарастания водоема могут быть завышены, так как они, вероятно, базировались на официальных данных о площади водохранилища.

В большинстве литературных источников, вероятно, было использовано значение из технического отчета о строительстве канала Москва – Волга. Отчет был выпущен в первые годы существования водохранилища, и в нем приведены проектные значения.

Площадь водоема по данным ДЗЗ при уровнях, близких к НПУ в большинстве случаев находится в пределах 220–240 км<sup>2</sup>. Эти значения справедливы при уклоне водной поверхности в период межени. При пропуске максимальных расходов воды, когда кривые свободной поверхности Иваньковского водохранилища имеют значительный уклон, могут происходить существенные подтопления в верховьях Шошинского плеса, а также менее значительные подтопления в среднем течении Волжского плеса и в устье Шоши.

Поскольку площадь водного зеркала Иваньковского водохранилища по данным ДЗЗ значитель-

но отличается от приведенных в [Приказ..., 2019], необходимо проведение новых наземных исследований по уточнению морфометрических характеристик водоема для построения батиметрической кар-

ты водоема, отбивки береговой линии, определения площади водного зеркала при НПУ, уточнения полного объема водохранилища при НПУ и площади зарастания макрофитами.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 24–27–00034.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большой советский атлас мира: в 2 т. М.: Изд. по постановлению ЦИК и СНК СССР. 1939. Т. 2.
- Бочаров А.В., Межеумов И.Н., Пахомов П.М. и др. Территориальная дифференциация водных и наземных геосистем с использованием данных космических сенсоров // Гидрометеорология и экология. 2021. Т. 65. С. 726–737. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-65-726-737.
- Волга и ее жизнь. Л.: Наука. 1978. 350 с.
- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 292 с.
- Гречушников М.Г., Григорьева И.Л., Ломова Д.В. и др. Формирование гидроэкологической структуры Иваньковского водохранилища в летний период в смежные годы с различными погодными условиями // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 3. С. 373–388.
- Григорьева И.Л., Федорова Л.П. Негативные изменения гидроэкологического состояния Иваньковского водохранилища под воздействием антропогенных факторов // Труды научной сессии, посвященной 90-летию кафедры гидрологии суши факультета географии и геоэкологии СПбГУ «Географические и экологические аспекты гидрологии» С.-Петербург, 26–27 марта 2008 г. СПб., 2010. С. 131–134.
- Иваньковское водохранилище и его жизнь. Л.: Наука. 1978. 304 с.
- Канал Москва – Волга. 1932–1937. Технический отчет. Ленинград: Стройиздат, 1940. 316 с.
- Карты РККА Валдайской возвышенности. Состояние местности на 1940–1941. Масштаб 1 : 200 000. Составлена и вычерчена в Ленинградской картографической части по карте 1 : 100 000. М.: Генеральный штаб РККА, 1941.
- Карты РККА Европейской части СССР. Состояние мест-
- ности на 1937–1941. Масштаб 1 : 500 000. М.: Генеральный штаб РККА, 1941.
- Приказ Росводресурсов от 31.05.2019 № 125 «Об утверждении Правил использования водных ресурсов Иваньковского водохранилища на р. Волге» // Зарегистрирован в Минюсте России 14.08.2019 № 55596.
- Тихомиров О.А. Трансформация структуры аквальных комплексов равнинного водохранилища // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2010. № 1. С. 44–49.
- Чичкова Е.Ф., Кондратьев С.А., Рыжиков Д.М. и др. Идентификация типов подстилающей поверхности по данным спутниковой съемки Landsat с целью оценки биогенной нагрузки на Финский залив // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. № 43. С. 246–254.
- Экологические проблемы Верхней Волги: коллективная монография. Ярославль: ЯГТУ. 2001. 427 с.
- Электронные ресурсы*
- Схематическая карта Калининской области 1937 г. Масштаб 1 : 500 000. URL: [https://primo.nl.ru/permalink/f/df0lai/07NLR\\_LMS012864108](https://primo.nl.ru/permalink/f/df0lai/07NLR_LMS012864108) (дата обращения 08.07.2024).
- Copernicus DEM – Глобальная и европейская цифровая модель рельефа. URL: <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model> (дата обращения 01.05.2024).
- Google Earth Engine, URL: <https://code.earthengine.google.com/> (дата обращения 30.04.2024).
- Sentinel-2 Mission guide, URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (дата обращения 30.04.2024).
- U.S. Geological Survey. Landsat Satellite Missions (Landsat-2), URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-2> (дата обращения 30.04.2024).

Поступила в редакцию 24.08.2024

После доработки 10.02.2025

Принята к публикации 20.05.2025

# UPDATING OF THE WATER SURFACE AREA OF THE IVANKOVSKOYE RESERVOIR BASED ON THE EARTH REMOTE SENSING DATA

A.V. Bocharov<sup>1</sup>, M.G. Grechushnikova<sup>2</sup>, S.I. Bidenko<sup>3</sup>, S.A. Lebedev<sup>4</sup>, I.L. Grigoryeva<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Tver State University, Faculty of Geography and Geoecology, Department of Physical Geography and Ecology; Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Laboratories of Experimental Ocean Physics

<sup>1,2</sup> Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Ivankovo Research Station

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

<sup>3</sup> JSC NPO Impulse, Department of Innovative Development and Strategic Planning

<sup>4</sup> Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geoinformatics and Geomagnetic Research; Maikop State Technological University, Laboratory of Geoinformatics, Geoecology and Rational Nature Management

<sup>5</sup> Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry

<sup>1</sup> Senior Lecturer; Engineer; Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: bochalex@bk.ru

<sup>2</sup> Head of the research group; Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: allavis@mail.ru

<sup>3</sup> Chief expert, D.Sc. in Tech.; e-mail: sibidenko@mail.ru

<sup>4</sup> Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Phys.-Math.; e-mail: sergey\_a\_lebedev@mail.ru

<sup>5</sup> Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: irina\_grigorieva@list.ru

The Ivankovskoye Reservoir is a shallow reservoir of the valley-basin type. Low banks and overgrowing of shallow waters cause difficulties in determining its coastline and water surface area. In the Order of Rosvodresursy dated 31.05.2019 no. 125, the area of the reservoir is indicated as 316 km<sup>2</sup>, while the earlier publications gave the value of 327 km<sup>2</sup>. However, even a preliminary analysis of remote sensing data proves that the actual area of the Ivankovskoye Reservoir differs significantly from those mentioned in publications. The work is devoted to clarifying the water surface area of the reservoir using satellite data. The available cartographic materials and remote sensing data, starting from the filling of the reservoir to the present were assessed. According to retrospective data, it was established that the area of the reservoir on the maps compiled in the first years after filling was significantly larger than on later maps, which show a significant decrease of the part of the Shoshinsky reach. The total area of the reservoir is equal to or less than the reference values. The first available satellite images of the Ivankovskoye Reservoir water area date back to the early 1970s, which allows estimating the area of the reservoir from that period to the present. The Sentinel-2 satellite images were used for interpretation and analysis. Based on remote sensing data, the values of the actual area of the Ivankovskoye Reservoir water surface were identified at different water levels during the period of no ice formation. According to the obtained data, the actual area of the reservoir at levels close to the normal backwater is in most cases within 220–240 km<sup>2</sup>, which is 22–31% less than in the interpolation table of the surface area of the Ivankovskoye Reservoir at different water levels given in the “Rules for the Use of Water Resources of the Ivankovskoye Reservoir on the Volga River” (Order of Rosvodresursy dated 31.05.2019 no. 125). The use of an overestimated water surface area of the reservoir in research and design projects distorts the assessment of the reservoir’s impact on the environment and other ecological and hydrological characteristics. The paper provides an example of calculating methane emissions from the Ivankovskoye Reservoir, which turned out to be 20–25% lower based on the adjusted area. It is recommended to clarify the morphometric characteristics of the Ivankovskoye Reservoir in the coming years.

**Keywords:** boundaries of water bodies, water levels, morphometric characteristics, Sentinel-2, Landsat-2, methane emission

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project 24-27-00034).

## REFERENCES

- Bocharov A.V., Mezheumov I.N., Pakhomov P.M. at el. Territorial'naya differentsiatsiya vodnykh i nazemnykh geosistem s ispol'zovaniem dannykh kosmicheskikh sensorov [Territorial differentiation of water and terrestrial geosystems using data from space sensors], *Gidrometeorologiya i Ekologiya*, 2021, no. 65, p. 726–737, DOI: 10.33933/2713-3001-2021-65-726-737. (In Russian)
- Bol'shoi sovetskii atlas mira, v 2 t. [The Great Soviet Atlas of the World, in 2 vol.], Moscow, Published by resolution of the Central Executive Committee and the Council of People's Commissars of the USSR, 1939, vol. 2. (In Russian)
- Chichkova E.F., Kondrat'ev S.A., Ryzhikov D.M. at el. Identifikatsiya tipov podstilayushchei poverkhnosti po dannym sputnikovoi s'emki Landsat s tsel'yu otsenki biogennoi nagruzki na finskii zaliv [Identification of underlying surface types using Landsat satellite imagery to assess nutrient load in the Gulf of Finland], *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2016, no. 43, p. 246–254. (In Russian)



- Ekologicheskie problemy Verkhnei Volgi: Kollektivnaya monografiya* [Environmental problems of the Upper Volga River: Collective monograph], Yaroslavl, YaGTU Publ., 2001, 427 p. (In Russian)
- Gidrometeorologicheskii rezhim ozer i vodokhranilishch SSSR. Vodokhranilishcha Verkhnei Volgi [Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Reservoirs of the Upper Volga River], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 292 p. (In Russian)
- Grechushnikova M.G., Grigoryeva I.L., Lomova D.V. at el. Formirovanie gidroekologicheskoi struktury Ivan'kovskogo vodokhranilishcha v letnii period v smezhnye gody s razlichnymi pogodnymi usloviyami [Formation of the hydroecological structure of the Ivankovsky reservoir in the summer period in adjacent years with different weather conditions], *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2024, vol. 60, no. 3, p. 373–388. (In Russian)
- Grigoryeva I.L., Fedorova L.P. [Negative changes in the hydroecological state of the Ivankovo reservoir under the influence of anthropogenic factors], *Geograficheskie i ekologicheskie aspekty gidrologii* [Proceedings of the scientific session dedicated to the 90th anniversary of the Department of Land Hydrology of the Faculty of Geography and Geocology of St. Petersburg State University “Geographical and Environmental Aspects of Hydrology”], March 26–27, 2008, St. Petersburg, 2010, p. 131–134. (In Russian)
- Ivan'kovskoe vodokhranilishche i ego zhizn'* [Ivankovskoye Reservoir and its life], Leningrad, Nauka Publ., 1978, 304 p. (In Russian)
- Kanal Moskva-Volga. 1932–1937. Tekhnicheskii otchet* [Moscow–Volga Canal. 1932–1937. Technical report], Leningrad, Stroizdat Publ., 1940, 316 p. (In Russian)
- Karta RKKA Evropeiskoi chasti SSSR. Sostoyanie mestnosti na 1937–1941. Masshtab 1 : 500 000* [The Red Army Map of the European part of the USSR. State of the area as of 1937–1941. Scale 1 : 500 000], 1941. (In Russian)
- Karta RKKA Valdaiskoi vozvyshennosti. Sostoyanie mestnosti na 1940–1941. Masshtab 1 : 200 000* [The Red Army Map of the Valdai Hills. State of the area as of 1940–1941. Scale 1 : 200 000], 1941. (In Russian)
- Prikaz Rosvodresursov* ot 31.05.2019 no. 125 “Ob utverzhdenii Pravil ispol'zovaniya vodnykh resursov Ivan'kovskogo vodokhranilishcha na r. Volge” [Order of Rosvodresursov dated May 31, 2019 No 125 “On approval of the Rules for the use of water resources of the Ivankovo Reservoir on the Volga River”], 2019. (In Russian)
- Tikhomirov O.A. Transformatsiya struktury akval'nykh kompleksov ravninnogo vodokhranilishcha [Transformation of the structure of aquatic complexes of a lowland reservoir], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2010, no. 1, p. 44–49. (In Russian)
- Volga i ee zhizn'* [Volga and its life], Leningrad, Nauka Publ., 1978, 350 p. (In Russian)
- Web sources*
- Skhematicheskaya karta Kalininskoi oblasti 1937. Masshtab 1 : 500 000* [Schematic map of the Kalinin region 1937. Scale 1 : 500 000], URL: [https://primo.nlr.ru/permalink/f/df0lai/07NLR\\_LMS012864108](https://primo.nlr.ru/permalink/f/df0lai/07NLR_LMS012864108) (access date 08.07.2024). (In Russian)
- Copernicus DEM – Global and European Digital Elevation Model, URL: <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model> (access date 01.05.2024).
- Google Earth Engine, URL: <https://code.earthengine.google.com/> (access date 08.07.2024).
- Sentinel-2 Mission guide, URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (access date 30.04.2024).
- U.S. Geological Survey. Landsat Satellite Missions (Landsat-2), URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-2> (access date 30.04.2024).

Received 24.08.2024

Revised 10.02.2025

Accepted 20.05.2025