

Научная статья

УДК 528.88:556.55

<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-76-86>

ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МАЛЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Валерия Николаевна Габова

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
gabova@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5655-8095>

Аннотация. В целях определения эффективного способа оконтуривания водного зеркала на основе снимка «Canopus-B6» (2,1 м) от 12.08.2020 произведена оценка морфометрических параметров Соколовского водохранилища – основного источника водоснабжения шахтерского района Ростовской области. Площадь зеркала и протяженность уреза воды, видимого на космическом снимке, получены тремя способами: классификацией с обучением, расчетом нормализованного разностного водного (NDWI) и вегетационного (NDVI) индексов с извлечением полигонов водной поверхности. Наибольшую точность показала маска, полученная с помощью компьютерного дешифрирования (каппа Коэна 0,73). Ошибки идентификации индексными растрами прослеживаются в правой прибрежной части. Слабая достоверность индексов, вероятно, связана с влиянием отмершей органики или прозрачностью прибрежных вод. Полученная площадь водохранилища меньше проектной на 1,28 км², что может быть связано с маловодностью 2020 г. или зарастанием участка. Выполнен подсчет площадей под прибрежной и водной растительностью для каждого участка Соколовского водохранилища. С помощью анализа серии спутниковых снимков с сервиса Google Earth прослежена динамика зарастания мелководного участка водохранилища с 2013 по 2019 г., выявившая переход от сезонного явления к устойчивому закреплению тростниковых зарослей.

Ключевые слова: Соколовское водохранилище, космоснимки высокого пространственного разрешения, морфометрические параметры, компьютерное дешифрирование, нормализованный разностный вегетационный индекс, нормализованный разностный водный индекс, зарастание водохранилища

Для цитирования: Габова В.Н. Применение космических снимков высокого пространственного разрешения для изучения малых водохранилищ // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2026. № 1. С. 76–86. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-76-86>

Благодарности: исследование выполнено в Институте наук о Земле Южного федерального университета при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

THE USE OF HIGH SPATIAL RESOLUTION SATELLITE IMAGES FOR SMALL RESERVOIRS STUDYING

Valeria N. Gabova

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
gabova@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5655-8095>

Abstract. To determine an effective method of contouring a water surface based on the “Canopus-B6” (2,1 m) image from August 12, 2020, the morphometric parameters of the Sokolovskoe reservoir, the main source of water supply in the miner district of the Rostov region, were evaluated. The water surface area and the visible water edge length were obtained in three ways: supervised classification, calculation of the normalized difference water (NDWI) and vegetation (NDVI) indices with the water surface polygons extraction. The mask obtained by computer decryption showed the highest accuracy (Cohen's kappa 0.73). Identification errors by index rasters can be

© Габова В.Н., 2026

traced in the right coastal area. The low reliability of the indices is probably due to the influence of dead organics or the transparency of coastal waters. The resulting reservoir area is less than the design area by 1.28 km², which may be due to the lack of water in 2020 or the site overgrowth with vegetation. The areas under coastal and aquatic vegetation have been calculated for each section of the Sokolovskoe reservoir. Using a series of satellite images from Google Earth, the overgrowth dynamics in the shallow part of the reservoir from 2013 to 2019 was traced. The assessment revealed a transition from seasonal bottom outcropping to the reed beds steady anchoring.

Keywords: Sokolovskoe reservoir, high spatial resolution satellite images, morphometric parameters, computer decryption, normalized difference vegetation index, normalized difference water index, reservoir overgrowth

For citation: Gabova V.N. The Use of High Spatial Resolution Satellite Images for Small Reservoirs Studying. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2026;(1):76-86. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2026-1-76-86>

Acknowledgments: the study was conducted at the Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, with the support of the Russian Science Foundation grant No. 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Введение

Мониторинг динамики площади водного зеркала позволяет оценивать эффективность управления водными ресурсами, а также осуществлять прогноз экологического состояния водохранилищ. Совокупность антропогенных и климатических факторов, как известно, способна оказывать влияние на гидрологический режим водных объектов, что может выражаться в изменении поверхностного стока. Оценки возможных сокращений уровня воды, полезного объема и, соответственно, площади зеркала водохранилищ европейской территории России в условиях изменения климата отражены в работах [1, 2]. Поэтому определение масштабов изменений морфометрических параметров искусственных водоемов является важной задачей как с научной, так и с практической точки зрения.

Учитывая доступность архивов спутниковой съемки среднего пространственного разрешения, дистанционные методы позволяют получить информацию о морфометрических характеристиках водных объектов в широком временном охвате и в более краткие сроки, чем при проведении натурных измерений. Однако исследование водоемов с относительно небольшой площадью на основе космических изображений среднего пространственного разрешения (10–30 м) вызывает затруднения, так как границы этих объектов на таких снимках едва различимы. В данном случае более целесообразно использовать изображения высокого пространственного разрешения (от 1,0 до 2,5 м), минимизируя тем самым погрешности при картографировании.

Объектом исследования выступило Соколовское водохранилище, расположенное на р. Кундрючьей в западной части Ростовской области. Водоохранилище построено в 1952 г. для обеспечения хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения городов Новшахтинск, Красный Сулин и прилегающих поселков [3]. Отмечается, что фактический расход воды значительно превышает проектный (34 тыс. м³ в сутки), достигая 55 тыс. м³ в сутки [4]. Поэтому комплексный мониторинг состояния Соколовского водохранилища является важным аспектом для поддержания и сохранения основных его функций. Предшествующее исследование [5] определило ключевые морфометрические параметры водосборного бассейна Соколовского водохранилища, такие как площадь водосбора (449,7 км²), густота эрозионной сети (1,1–16,7 км/км²), средняя высота (230,1 м) и уклон территории (2,5°). Данная работа стала продолжением определения морфометрических и гидрологических особенностей рассматриваемой акватории.

Цель исследования состоит в расчете морфометрических параметров Соколовского водохранилища на основе многозонального космического снимка высокого пространственного разрешения с применением трех различных способов: при помощи классификации с обучением и использованием спектральных индексов NDWI, NDVI, а также в выборе и обосновании наиболее подходящего способа оконтуривания водного зеркала из представленных. Результаты исследования необходимы для понимания эффективности дальнейшего применения этих методик в оценке динамики морфометрических параметров данного искусственного водоема.

Для достижения целей исследования были поставлены следующие задачи:

- классификация космического снимка с обучением и расчет спектральных индексов NDWI, NDVI для извлечения маски поверхности воды;
- оценка точности классификации;
- расчет площади зеркала и протяженности уреза Соколовского водохранилища на основе растров, полученных перечисленными выше способами;
- сравнение результатов и выбор наиболее достоверного из них;
- расчет площади зарослей водной и прибрежной растительности (тростник, осока и др.) в мелко-водных участках Соколовского водохранилища с применением компьютерного дешифрирования;
- визуальная оценка динамики зарастания верхнего участка водохранилища на основе серии разновременных снимков и выявление факторов, обуславливающих тенденции зарастания.

Материалы и методы исследования

Река Кундрючья протекает по восточному склону Донецкого кряжа и справа впадает в р. Северский Донец – главный приток р. Дон. Объект исследования расположен в западной подобласти атлантико-континентальной европейской (степной) области умеренного климатического пояса [6]. Для района характерно недостаточное увлажнение с жарким, сухим летом и относительно теплой зимой [3]. С 1980 г. отмечается увеличение значений температуры воздуха и ее климатической нормы, что сопровождается возрастанием длительности засушливых периодов на территории в летние месяцы [7, 8]. По морфологическому строению Соколовское водохранилище является долинным русловым. Водный объект вытянут с севера на юг и юго-восток. Нормальный подпорный уровень (НПУ) водохранилища равен 139,25 м, проектная площадь зеркала искусственного водоема при НПУ составляет 4,26 км² [4]. По данным [3], площадь зеркала Соколовского водохранилища – 3,9 км², протяженность – 8,5 км, объем при данном НПУ – 19,8 млн м³. Критерием для отнесения водохранилища к категории малых послужила площадь его акватории (менее 10 км²), принятая в работе [9]. Максимальная глубина водоема в районе плотины составляет 17,1 м, средняя глубина – 5 м. В верхней части водохранилища и в устье р. Галуты – правого притока Соколовского водохранилища – отмечается наименьшая глубина – 2 м. В устье р. Галуты образован залив длиной 1400 м и шириной до 300 м [3].

Для расчета площади зеркала и протяженности уреза Соколовского водохранилища использовано рап-sharp-изображение со спутника «Канопус-В6» с пространственным разрешением 2,1 м, дата съемки 12.08.2020. Снимок имеет уровень обработки L2, т.е. выполнена радиометрическая и геометрическая коррекция изображения, а также произведена трансформация в картографическую проекцию (универсальная поперечная проекция Меркатора UTM, система координат WGS 84) [10]. В дальнейшем данные спутниковой съемки трансформированы в локальную систему координат Pulkovo 1942, проекция Гаусса – Крюгера, зона 7. Некоторые технические характеристики съемочной аппаратуры «Канопус-В6» представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Технические характеристики бортовой аппаратуры спутника «Канопус-В6» [13]
 / Technical characteristics of the “Canopus-B6” satellite on-board equipment [13]**

Параметр	Панспектральная съемка	Мультиспектральная съемка
Спектральные диапазоны, мкм	Панхроматический (0,45–0,85)	Синий (0,46–0,52) Зеленый (0,52–0,60) Красный (0,63–0,69) Ближний ИК (0,75–0,86)
Разрешение на местности, м	2,1	10,5
Ширина полосы захвата, км	23	40

Исходя из метаданных, снимок «Канопус-В6» был получен в 08:15 мск. По данным [11], в это время отмечался юго-западный ветер со скоростью 2 м/с, небо ясное, температура воздуха составляла +25,1 °С. Таким образом, погодные условия на момент съемки являются удовлетвори-

тельными для выполнения задач исследования, так как отсутствуют облачное перекрытие исследуемой акватории и выраженная рябь на водной поверхности в силу слабого ветра. Следует также отметить, что в районе Соколовского водохранилища, по данным метеостанции г. Шахты, в 2020 г. наблюдался засушливый период с июля по сентябрь [7, 8]. В целом 2020 г. отмечался как маловодный год редкой повторяемости. По дефициту водных ресурсов бассейн р. Дон находился на втором месте среди крупных бассейнов Южного федерального округа. Так, для Цимлянского водохранилища дефицит водных ресурсов по отношению к полезному объему (млн м³) составил почти 83 %. Для Краснодарского водохранилища на р. Кубани дефицит составил 100 % [12]. Дефицит водного стока в сложившихся природно-климатических условиях лета 2020 г. не мог не отразиться на площади Соколовского водохранилища, что и послужило основным фактором при выборе космического изображения от 12.08.2020.

Контролируемая классификация с обучением используется в том случае, когда исследуемая местность хорошо известна оператору. В основе процесса лежит сравнение спектральных характеристик пикселей (ячеек) с эталонными значениями, выделенными оператором, в каждом канале космического снимка, после чего происходит отнесение пикселя к определенному классу со схожими спектральными характеристиками. В качестве эталонов отмечены водная поверхность (с отдельным выделением прибрежной зоны), прибрежная растительность, древесная растительность, травянистая растительность, застройка (здания и дороги) и пашня. Для дальнейшей работы из результирующего растра извлечена маска воды и маска прибрежной и водной растительности, так как они являются ключевыми для данного исследования.

NDWI (Normalized Difference Water Index) – это нормализованный разностный водный индекс, позволяющий увеличить контраст водных объектов на основе разности яркости в видимом зеленом и ближнем инфракрасном спектрах. Индекс изменяется от –1 до 1, где ячейки водной поверхности на снимке принимают положительные значения [14]. NDWI рассчитывается по формуле $NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$, где NIR – ближний инфракрасный канал; GREEN – видимый зеленый канал.

Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (normalized difference vegetation index) основан на соотношении ближнего инфракрасного и видимого красного канала [15]. Индекс широко используется для оценки состояния фитомассы, однако также может быть применен при изучении водных объектов, так как позволяет четко отделить водную гладь от других типов поверхности. Ячейки воды принимают отрицательные значения (около –0,25). NDVI рассчитывается по формуле $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$, где NIR – ближний инфракрасный канал; RED – видимый красный канал.

В результате обработки спутникового изображения получены три растра, из которых в последующем для расчета морфометрических характеристик извлечены области, покрывающие исследуемую акваторию. Выполнено сравнение эффективности применяемых операций и выявлен наиболее подходящий для данного водного объекта способ получения информации о площади зеркала и протяженности уреза воды Соколовского водохранилища.

Оценка точности полученных слоев произведена при помощи матрицы ошибок, инструмент Confusion Matrix [16]. Этот способ оценки точности позволяет определить долю верно классифицированных точек и вычислить взвешенную каппу Коэна, представляющую собой меру согласия между наблюдаемыми параметрами. В данном случае объекты полученных растров сравниваются с исходным космоснимком. Для каждой из масок водной поверхности построена точечная сетка с шагом 50×50 м (всего 1185 точек), где атрибуты, отнесенные к водной поверхности, имеют значение 1, прочие атрибуты – 0. Аналогичным образом произведена оценка точности маски прибрежной и водной растительности (всего 294 точки).

Результаты и обсуждение

Все три примененных способа извлечения пространственной информации о водной поверхности показали различную точность оконтуривания водного зеркала. Наибольшую точность демонстрирует растр, полученный с помощью классификации с обучением. Каппа Коэна составляет 0,73, что говорит об устойчивой согласованности измерений (табл. 2).

Таблица 2/ Table 2

Матрица ошибок классифицированного изображения «Канопус-В6» для водной поверхности / Confusion matrix of the classified “Canopus-B6” image for the water surface

№	ClassValue	C_0	C_1	Total	U_Accuracy	Катта
1	C_0	19	12	31	0,61	0
2	C_1	2	1152	1154	0,998	0
3	Total	21	1164	1185	0	0
4	P_Accuracy	0,90	0,99	0	0,99	0
5	Катта	0	0	0	0	0,73

Примечание. C_0 – прочие классы; C_1 – класс водной поверхности; Total – общее количество точек; U_Accuracy – пользовательская точность; P_Accuracy – производственная точность; Катта – взвешенная капта Коэна.

Наименее достоверные результаты получены на основе расчета индексов NDWI и NDVI. Точность классификации составила 0,45 и 0,32 соответственно, что свидетельствует в первом случае об умеренной и во втором случае о малой согласованности между космическим снимком и классифицированным изображением.

Площадь под прибрежной и водной растительностью, полученная с помощью компьютерного дешифрирования, составила 0,77 км², взвешенная капта Коэна равна 0,76 (табл. 3).

Морфометрические характеристики Соколовского водохранилища, рассчитанные по результатам обработки снимка «Канопус-В6», представлены в табл. 4.

Таблица 3/ Table 3

Матрица ошибок классифицированного изображения «Канопус-В6» для прибрежной и водной растительности / Confusion matrix of the classified “Canopus-B6” image for the coastal and water vegetation

№	ClassValue	C_0	C_1	Total	U_Accuracy	Катта
1	C_0	122	13	135	0,90	0
2	C_1	22	137	159	0,86	0
3	Total	144	150	294	0	0
4	P_Accuracy	0,85	0,91	0	0,88	0
5	Катта	0	0	0	0	0,76

Прмечание. Обозначения те же, что и в табл. 2.

Таблица 4/ Table 4

Морфометрические характеристики Соколовского водохранилища / Morphometric characteristics of the Sokolovskoe reservoir

Способ определения	Площадь зеркала, км ²	Протяженность уреза воды, км	Катта	Площадь под прибрежной и водной растительностью, км ²	Итого площадь зеркала и прибрежной и водной растительности, км ²	Катта
NDVI	2,72	26,6	0,32	–	–	–
NDWI	2,85	26,0	0,45	–	–	–
Классификация с обучением	2,98	30,9	0,72	0,77	3,75	0,76

Невысокая точность растров, полученных на основе спектральных индексов NDWI и NDVI, обусловлена тем, что прибрежная зона местами вдоль левого и правого берега водохранилища идентифицировалась скорее как открытая почва (NDVI ≈ 0,02–0,3, NDWI < 0), вследствие чего

линия уреза смещена по отношению к ее видимому положению на момент съемки. Максимальное расстояние от уреза составило 43 м для растра на основе NDWI и 40 м для NDVI. На рис. 1 представлен усредненный спектральный профиль участков прибрежной зоны со значениями индексов, нетипичными для водной поверхности. Профиль демонстрирует постепенное увеличение яркости от синего к ближнему инфракрасному спектру. Кривая нетипична и для цветения воды, так как отсутствует провал в красной зоне спектра. Отметим, что цветение 12.08.2020 было визуально выражено слабо и отмечалось лишь в небольшой части верховья водохранилища, свободной от прибрежной и водной растительности.

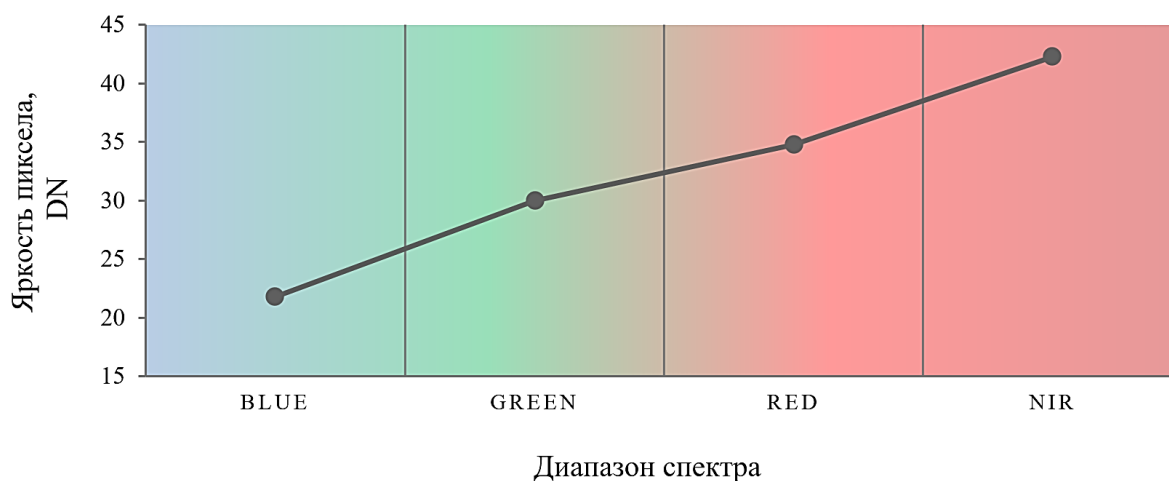


Рис. 1. Спектральный профиль прибрежных участков с нетипичными значениями NDVI и NDWI для водной поверхности / Fig. 1. Spectral profile of coastal areas with atypical NDVI and NDWI values for the water surface

Такая ситуация, по нашим предположениям, может быть связана с наличием частиц отмершей органики, образующих пленку агатовидной структуры на поверхности прибрежной зоны водохранилища, подобно той, что была описана в работе [17]. Одной из возможных причин ложного детектирования также может являться очень малая глубина и прозрачность прибрежных вод, поэтому на снимке, вероятно, прослеживается часть подводного берегового склона с песчаным дном.

Из рассматриваемых способов обработки снимка Соколовского водохранилища для расчета морфометрических характеристик наиболее эффективным стала классификация с обучением на основе спектральных характеристик пиксела. Полученная площадь зеркала водохранилища меньше проектной площади при НПУ на 1,28 км². Такая разница может быть связана не только с сокращением водности и, как следствие, изменением уровня воды в Соколовском водохранилище и площади под влиянием длительных засушливых периодов в районе исследования [7, 8], но и с увеличением покрытия отдельных участков прибрежной и водной растительностью. В работе [18] отмечается сильное зарастание тростником левого берега верхнего участка в пределах подпертого коренного русла р. Кундрючьей, в то время как верхний участок в пределах затопленной долины р. Кундрючьей свободен от тростниковой растительности. На космическом снимке 12.08.2020 (рис. 2а) и на фотографии, сделанной нами во время проведения рекогносцировки окрестностей Соколовского водохранилища 02.09.2022 (рис. 2б), видна зарастающая часть участка в пределах затопленной долины р. Кундрючьей.

Динамика многолетних снимков 2013–2019 гг. четко демонстрирует процесс трансформации рассматриваемого участка водохранилища (рис. 3). В мае 2013 г. участок был полностью затоплен (рис. 3а), а к августу 2014 года фиксируется понижение уровня воды с частичным обнажением дна в сопровождении интенсивного цветения воды (рис. 3б). Аналогичная ситуация наблюдается на снимке, полученном в июле 2016 г. (рис. 3в).

Регулярное сезонное обмеление и развитие фитопланктона предшествовали последующему закреплению тростниковой растительности на данном участке акватории. Так, в мае 2017 г., несмотря на восстановление уровня воды, на космическом снимке визуализируются первоначальные, разреженные заросли (рис. 3г).



Рис. 2. Верхний участок в пределах затопленной долины р. Кундрючьей: а – на космическом снимке со спутника «Канопус-В6» 12.08.2020; б – фотография участка, сделанная нами 02.09.2022 / Fig. 2. The upper section within the Kundryuchya river flooded valley: a - is shown in a satellite image from the “Canopus-B6” satellite on August 12, 2020; b - is a photograph of the site taken by the author on September 2, 2022

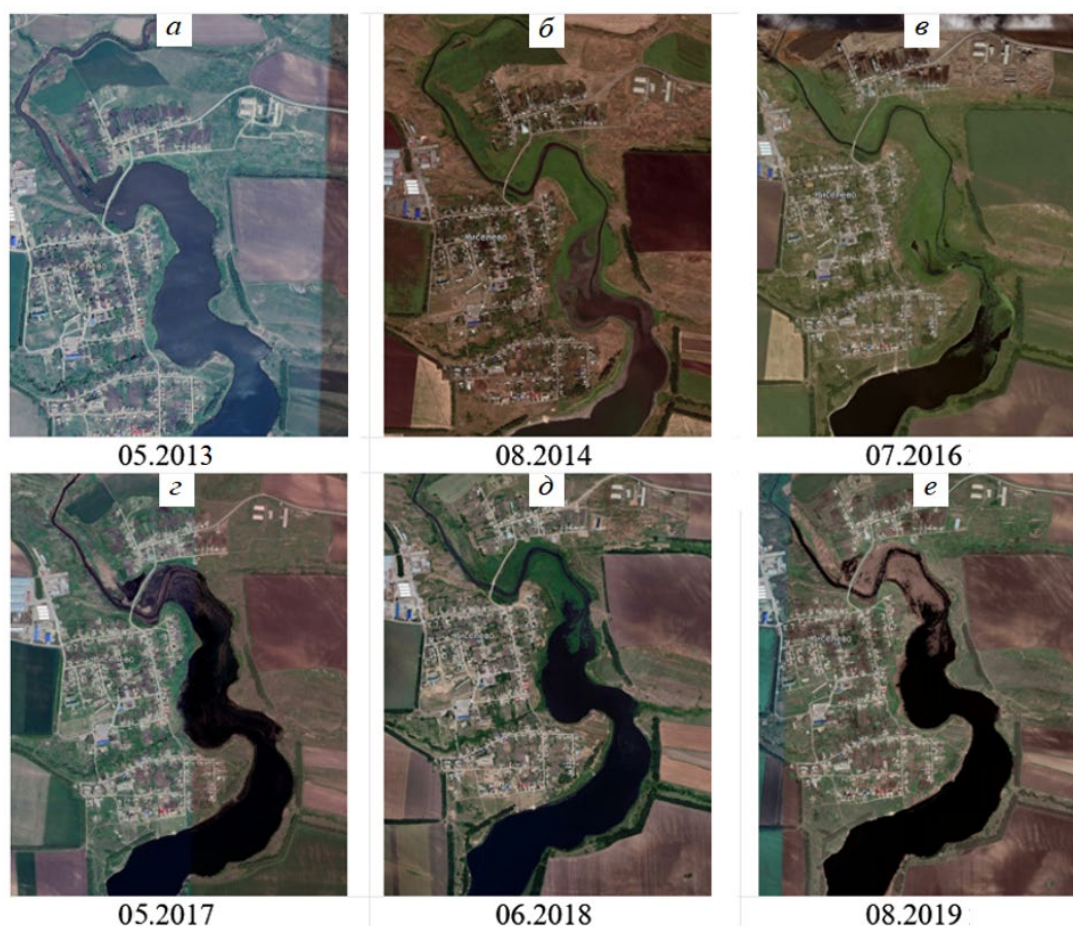


Рис. 3. Процесс трансформации участка Соколовского водохранилища в пределах затопленной долины р. Кундрючьей по данным космосъемки с сервиса Google Earth / Fig. 3. The transformation of the Sokolovskoe reservoir site within the flooded Kundryuchya river valley according to satellite imagery from Google Earth

Июнь 2018 и август 2019 гг. демонстрирует уже развитые и стабильные тростниковые заросли (рис. 3д, е). Развитие тростника после повышения уровня воды может свидетельствовать о необратимом процессе зарастания этой части акватории.

Так как заросли прибрежной и водной растительности, покрывающие мелководные части Соколовского водохранилища, являются препятствием для обнаружения водного зеркала, эти области были также извлечены из классифицированного изображения для подсчета их суммарной площади. Общая площадь прибрежных зарослей на рассматриваемом космоснимке составила 0,77 км². Следовательно, площадь водохранилища, включая водную поверхность и заросли прибрежной и водной растительности, – 3,74 км². Для каждого участка существующей схемы акваториального районирования [18] установлены площади тростниковых зарослей, показавшие существенную вариабельность значений. Как и предполагалось, наибольшая степень зарастания характерна для верхнего участка в пределах затопленной долины р. Кундрючьей. Площадь под прибрежной и водной растительностью составила 0,203 км². Аккумуляция наносов, обширная зона мелководья и плоское дно, обнажаемое в периоды понижения уровня воды [18], создают условия для активного зарастания этой части акватории Соколовского водохранилища. Значительное зарастание отмечается на среднем участке, расположенном выше устья р. Галуты (0,133 км²), и на левом берегу приплотинного участка (0,128 км²), что приурочено к пологому подводному склону и наличию небольших заливов, пересыхающих при низких уровнях воды. Умеренное зарастание зафиксировано на отдельных частях среднего участка ниже р. Галуты (0,102 км²) и нижнего участка в районе перехода газопровода через водохранилище (0,090 км²). Сравнительно минимальная степень зарастания отмечается на верхнем участке в пределах подпертого русла р. Кундрючьей (0,057 км²), а также в заливе р. Галуты (0,055 км²). Эти два участка отличаются наименее благоприятными для зарастания условиями: в первом случае – узкое глубокое русло р. Кундрючьей, во втором – ограниченная площадь и преобладание крутых берегов [18].

Полученная путем компьютерного дешифрирования маска зеркала Соколовского водохранилища, включая участки, покрытые прибрежной растительностью, представлена на рис. 4.

Оценка площадей зарослей на основе схемы акваториального районирования имеет практическую ценность не только для выявления ключевых факторов зарастания, но и для определения вклада прибрежной и водной растительности искусственных водоемов в образование потоков парниковых газов [19].

Заключение

По результатам обработки снимка высокого пространственного разрешения со спутника «Канопус-В6» автором получены данные о площади зеркала и протяженности уреза Соколовского водохранилища. Из рассматриваемых в работе способов расчета морфометрических характеристик исследуемого объекта наиболее эффективным показал себя расчет на основе компьютерной классификации с обучением. Его точность заметно превзошла точность расчетов на основе растров со значениями спектральных индексов NDWI и NDVI. Такая ситуация может быть связана с искажающим влиянием малых глубин и отмершей органики в прибрежной зоне водохранилища. Также одной из причин может являться прозрачность прибрежных вод. Площадь зеркала Соколовского водохранилища составила 2,98 км², протяженность береговой линии – 30,9 км². Различие фактической площади на 12.08.2020 с проектным значением может быть связано с уровнем воды ниже НПУ ввиду сокращения стока в засушливый и маловодный 2020 г. Помеху для идентификации водной поверхности также создало зарастание водохранилища прибрежной и водной растительностью. Учитывая заросшие поверхности, площадь Соколовского водохранилища на 2020 г. составила 3,74 км². Представленные в работе данные демонстрируют четкую связь между морфологией участков водохранилища и площадью зарастания. Сезонные колебания уровня воды, влекущие за собой частичное обнажение дна на мелководном участке, стали предпосылкой к формированию устойчивых зарослей верхнего участка водохранилища на затопленной долине р. Кундрючьей с 2013 по 2019 г. В наибольшей степени зарастанию подвержен верхний участок Соколовского водохранилища в пределах затопленной долины р. Кундрючьей.

Результаты геоинформационного анализа показали, что использованные в работе данные дистанционного зондирования Земли применимы для оценки морфометрических параметров малых равнинных водохранилищ и дальнейшего исследования их динамики, что подтверждается достаточной точностью результирующего растра, полученного путем компьютерного дешифрирования космоснимка с высоким пространственным разрешением. Методы изучения малых водохранилищ, предложенные в работе, также используются при изучении формирования, функционирования и эволюции озер юга европейской части России.

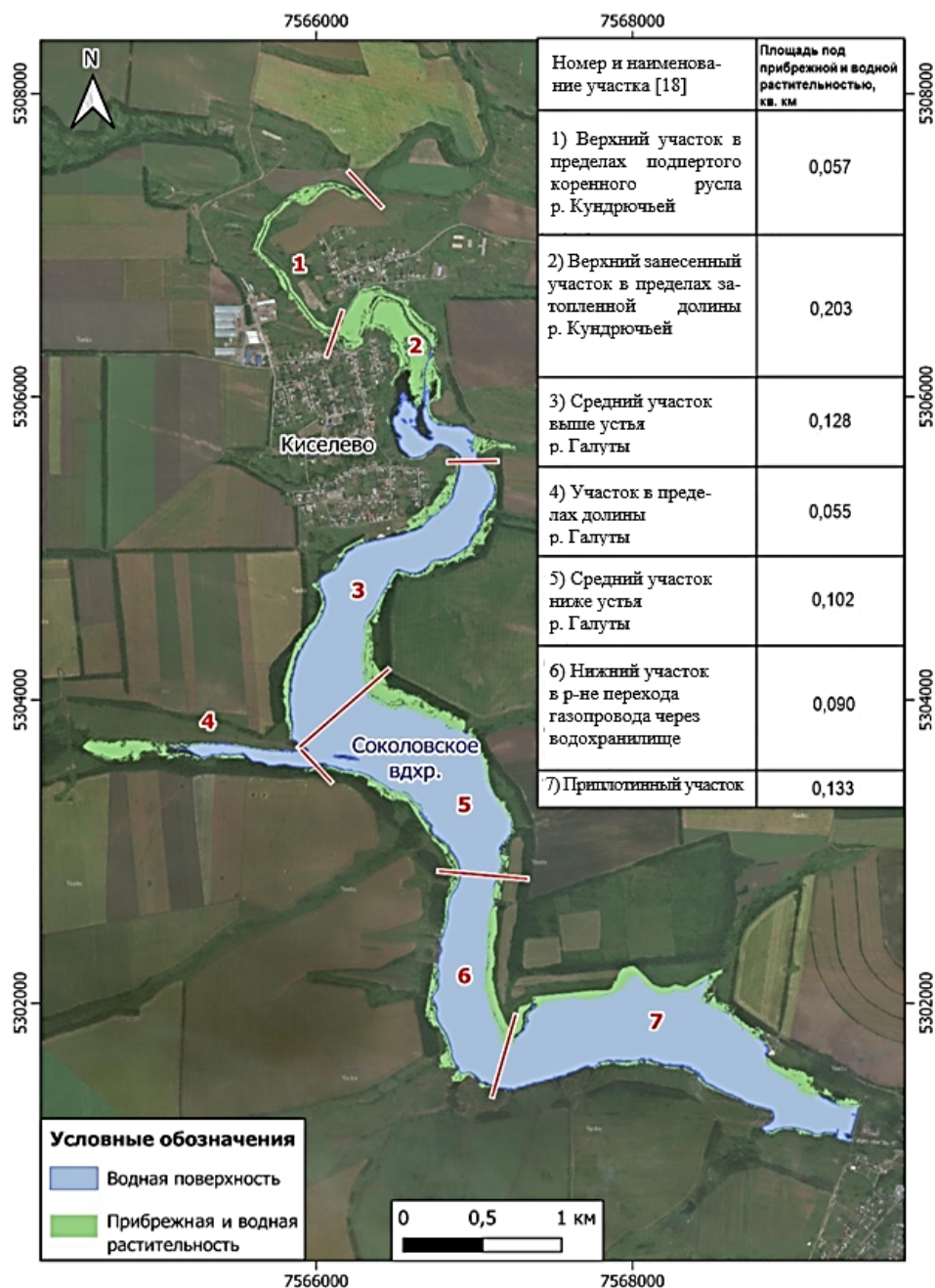


Рис. 4. Результат классификации водного зеркала Соколовского водохранилища, включая заросли прибрежной и водной растительности / Fig. 4. The classification result of the Sokolovskoe reservoir water surface, including coastal and aquatic vegetation thickets

Список источников

1. Гречушникова М.Г., Пуклакова Н.Г., Эдельштейн К.К. Возможное изменение гидрологического режима Цимлянского водохранилища при потеплении климата // Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География. 2014. № 4. С. 17–25. EDN: TAVMXJ.
2. Гречушникова М.Г., Эдельштейн К.К. Возможные изменения гидрологического режима Рыбинского водохранилища при потеплении климата // Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География. 2012. № 6. С. 61–67. EDN: PUZPKJ.
3. Лурье П.М., Панов В.Д. Река Дон: гидрография и режим стока. Ростов н/Д.: Донской изд. дом, 2018. 591 с.
4. Бреус А.В., Беспалов М.С., Усков И.В. Актуализированная схема водоснабжения и водоотведения города Новошахтинска Ростовской области. Новочеркасск, 2016. 239 с.

5. Габова В.Н., Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А. Морфометрический анализ водосборного бассейна Соколовского водохранилища с применением ГИС-технологий // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: География. Геоэкология. 2024. № 4. С. 93–104. EDN: OYKOJJ. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/4/93-104>
6. Алисов Б.А. Климат СССР. М.: МГУ, 1956. 127 с.
7. Габова В.Н., Федоров Ю.А., Бэллинджер О.Ю., Доценко И.В., Михайленко А.В. Динамика засушливых периодов на примере бассейнов Соколовского водохранилища и Таганрогского залива // Инженерный вестн. Дона. 2021. № 10. С. 226–239. EDN: JBXATJ.
8. Габова В.Н., Федоров Ю.А., Савицкий В.А., Доценко И.В. Динамика среднемесячных температур воздуха и атмосферных осадков в летний период в некоторых районах Ростовской области и Краснодарского края // Успехи соврем. естествознания. 2022. № 8. С. 25–38. EDN: DCNQQI. <https://doi.org/10.17513/use.37865>
9. Эдельштейн К.К. Морфология, водный режим и гидрологическая структура долинных водохранилищ: дис. ... д-ра геогр. наук. М., 1983. 403 с. EDN: VHVOGZ.
10. Руководство пользователя геопортала Роскосмоса. URL: <https://s3.gptl.ru/geoportal-public/user-guide/v0.1/index.html> (дата обращения: 09.06.2023).
11. Погода и климат: справ.-информ. портал. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 09.06.2023).
12. Кузьмичёв А.А., Рыжаков А.Н., Мартынов Д.В. Анализ дефицита водных ресурсов и использования мелиорированных земель в Южном федеральном округе // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11, № 3. С. 19–35. EDN: MAZMYF. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-19-35>
13. Геопространственное агентство ИННОТЕР. URL: <https://innoter.com/sputniki/kanopus-v/> (дата обращения: 09.06.2023).
14. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // Int. J. of Remote Sensing. 1996. Vol. 17, iss. 7. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
15. Tucker C.J., Sellers P.J. Satellite remote sensing of primary productivity // Int. J. of Remote Sensing. 1986. Vol. 11. P. 1395–1416.
16. Kulkarni A., Chong D., Batarseh F.A. Foundations of data imbalance and solutions for a data democracy // Data Democracy. Academic Press, 2020. P. 83–106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818366-3.00005-8>
17. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Трубник Р.Г., Талпа Б.В. Гидрохимия группы соленых озер Ставропольского края // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2018. № 4. С. 100–106. EDN: YSAVTF.
18. Дандара Н.Т., Немыкина Д.Е. Соколовское водохранилище на реке Кундрючья и его акваториальное районирование // Вестн. соврем. исследований. 2019. Т. 17, № 3. С. 32–38. EDN: JRGYUE.
19. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Косолапов А.Е., Усова Е.В., Анпилова Е.А., Верецагин М.А., Беляев А.И. Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 68–82. EDN: CXWKWU. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72>

References

1. Grechushnikova M.G., Puklakova N.G., Edelshtein K.K. Possible transformation of the hydrological regime of the Tsimlyansk reservoir under climate warming. *Lomonosov Geography Journal. Series: Geography*. 2014;(4):17-25. (In Russ.). EDN: TAVMXJ.
2. Grechushnikova M.G., Edelshtein K.K. Possible transformation of the hydrological regime of the Rybinsk reservoir under climate warming. *Lomonosov Geography Journal. Series: Geography*. 2012;(6):61-67. (In Russ.). EDN: PUZPKJ.
3. Lurie P.M., Panov V.D. *Don River: hydrography and flow regime*. Rostov-on-Don: Don Publishing House; 2018. 591 p. (In Russ.).
4. Breus A.V., Bepalov M.S., Uskov I.V. *Updated water supply system in Novoshakhtinsk, Rostov Region*. Novocheerkassk, 2016. 239 p. (In Russ.).
5. Gabova V.N., Kuznetsov A.N., Fedorov Yu.A. Morphometric analysis of the Sokolovsky reservoir catchment area using GIS-technologies. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2024;(4):93-104. (In Russ.). EDN: OYKOJJ. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/4/93-104>
6. Alisov B.A. *Climate of the USSR*. Moscow: Moscow State University; 1956. 127 p. (In Russ.).
7. Gabova V.N., Fedorov Yu.A., Ballinger O.Yu., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V. Dynamics of dry periods on the example of the basins of the Sokolovsky reservoir and the Taganrog Bay. *Engineering Journal of Don*. 2021;(10):226-239. (In Russ.). EDN: JBXATJ.

8. Gabova V.N., Fedorov Yu.A., Savitsky V.A., Dotsenko I.V. Dynamics of average monthly air temperatures and precipitation in summer in some areas of the Rostov and Krasnodar regions. *Advances in Current Natural Sciences*. 2022;(8):25-38. (In Russ.). EDN: DCNQQI. <https://doi.org/10.17513/use.37865>
9. Edelstein K.K. *Morphology, water regime and hydrological structure of valley reservoirs*. PhD thesis. Moscow, 1983. 403 p. (In Russ.). EDN: VHVOGZ.
10. *User guide for the Roscosmos geoportal*. URL: <https://s3.gptl.ru/geoportal-public/user-guide/v0.1/index.html> [Accessed 9th June 2023]. (In Russ.).
11. *Weather and climate*: reference and information portal. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> [Accessed 9th June 2023]. (In Russ.).
12. Kuzmichev A.A., Ryzhakov A.N., Martynov D.V. Analysis of water scarcity and the use of reclaimed land in the Southern federal district. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2021;11(3):19-35. (In Russ.). EDN: MAZMYF. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-19-35>
13. *INNOTER Geospatial Agency*. URL: <https://innoter.com/sputniki/kanopus-v/> [Accessed 9th June 2023]. (In Russ.).
14. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996;17(7):1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
15. Tucker C.J., Sellers P.J. Satellite remote sensing of primary productivity. *International Journal of Remote Sensing*. 1986;11:1395-1416.
16. Kulkarni A., Chong D., Batarseh F.A. Foundations of data imbalance and solutions for a data democracy. *Data Democracy*. Academic Press; 2020:83-106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818366-3.00005-8>
17. Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Trubnik R.G., Talpa B.V. The hydrochemistry a few salt lakes of the Stavropol region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2018;(4):100-106. (In Russ.). EDN: YSAVTF.
18. Dandara N.T., Nemykina D.E. Sokolovskoye Reservoir on the Kundryuchya River and its aquatic zoning. *Bulletin of Modern Research*. 2019;17(3):32-38. (In Russ.). EDN: JRGYUE.
19. Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Kosolapov A.E., Usova E.V., Anpilova E.A., Vereshchagin M.A., Belyaev A.I. Artificial water bodies as methane genesis hotbeds (the Tsimlyansk reservoir as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024;(3):68-82. (In Russ.). EDN: CXWKWU. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72>

Информация об авторе

В.Н. Габова – преподаватель кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ.

Information about the author

V.N. Gabova – Lecturer of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation, Institute of Earth Sciences, SFedU.

Статья поступила в редакцию 27.05.2025; одобрена после рецензирования 02.09.2025; принята к публикации 11.11.2025.
The article was submitted 27.05.2025; approved after reviewing 02.09.2025; accepted for publication 11.11.2025.
