

УДК: 528.71: 504.455

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-691-708

Е.А. Гончаров<sup>1</sup>, А.Н. Фадеев<sup>2</sup>, А.А. Иванов<sup>3</sup>, М.Ю. Тимофеева<sup>4</sup>

## ВОЗМОЖНОСТИ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНОГО ОБЪЕКТА И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЕГО ВОДОСБОРНОЙ ПЛОЩАДИ

### АННОТАЦИЯ

В ходе выполнения работы обобщен литературный и картографический материал, характеризующий озеро Морской глаз и его водосборную площадь. На основе данных разновременной съемки микродронами с геодезической привязкой базовых точек с использованием инструментов Agisoft Metashape и ГИС «Панорама» разработаны цифровые модели местности и рельефа котловины озера, определены уровни водоносных горизонтов и водосборная площадь. Водосборный бассейн озера не превышает 1,3 км<sup>2</sup>, при этом основное питание озера за счет поверхностного и грунтового стока формируется на площади около 0,6 км<sup>2</sup>. Здесь сосредоточено 45 индивидуальных жилых домов с локальной канализацией, а также частные водозаборные скважины. На земли сельских населенных пунктов и сельскохозяйственные угодья приходится соответственно 26 и 64 % территории основного водосбора. С использованием фотоматериалов озера, предоставленных пользователями соцсетей, цифровой модели местности в Agisoft Metashape выполнена реконструкция динамики уровней уреза воды озера за 2013–2022 гг., что позволило рассчитать в ГИС «Панорама» объемы воды озера на конкретные календарные даты и оценить скорости изменения объема воды. Нормальный уровень уреза воды составлял 121,5 м, полный объем озера – 53 185 м<sup>3</sup>. С 2014 г. начались значительные колебания уровня уреза воды в озере. При этом скорость прироста объема (запаса) воды в озере менялась от 3,9 до –3,6 дм<sup>3</sup>/с. Причиной отрицательного водного баланса, приведшей к полному исчезновению озера в марте 2022 г., может являться образование в конце зимы 2014 г. понора, последующее его расширение с периодическим перекрыванием осыпями и микрооползнями. Предложенный алгоритм на основе использования технологий Citizen science (сбора данных любительской фото- и видеосъемки) в сочетании с инструментами ГИС может быть использован для мониторинга водных объектов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** озеро, карст, фотограмметрия, цифровая модель местности, геоинформационная система, экологический мониторинг

---

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, 424000, Йошкар-Ола, Россия; *e-mail*: [GoncharovEA@volgatech.net](mailto:GoncharovEA@volgatech.net)

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, 424000, Йошкар-Ола, Россия; *e-mail*: [FadeevAN@volgatech.net](mailto:FadeevAN@volgatech.net)

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, 424000, Йошкар-Ола, Россия; *e-mail*: [IvanovAA@volgatech.net](mailto:IvanovAA@volgatech.net)

<sup>4</sup> ФГБОУ ВО Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, 424000, Йошкар-Ола, Россия; *e-mail*: [Marinellat@mail.ru](mailto:Marinellat@mail.ru)

**Evgenii A. Goncharov<sup>1</sup>, Aleksandr N. Fadeev<sup>2</sup>, Aleksey A. Ivanov<sup>3</sup>, Marina Yu. Timofeeva<sup>4</sup>**

## **POSSIBILITIES OF GIS TECHNOLOGIES FOR STUDYING HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF A WATER BODY AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF ITS CATCHMENT AREA**

### **ABSTRACT**

This work summarizes literary and cartographic material that characterizes the Morskoy Glaz Lake and its catchment area. The levels of aquifers and the catchment area of the lake were determined along with development of digital models of the terrain and relief of the lake basin, which were developed on the basis of multi-temporal microdrone photo-shooting with usage of geodetic referencing of basepoints using the tools of Agisoft Metashape and GIS “Panorama”. The catchment area of the lake doesn’t exceed more than 1.3 km<sup>2</sup>, while the main supply of water nourishment of the lake forms as a surface runoff and groundwater flow on an area of about 0.6 km<sup>2</sup>. This area contains 45 residential building connected by local sewerage and many private water wells. The lands of rural settlements and agricultural lands make up 26 % and 64 % of main catchment area, respectively. With the usage of photographic materials of the lake provided by users of social medias and usage of digital terrain models of Agisoft Metashape, a reconstruction of the dynamics of the lake water levels for 2013–2022 was carried out, which made it possible to calculate volumes of lake waters for specific calendar dates along with possibility of estimation of the rate of change of water volumes in the lake, which was achieved through the usage of tools of GIS “Panorama”. Long-term level of water’s edge of the lake is 121.5 meters, the total volume of the lake is 53,185 m<sup>3</sup>. Since 2014, there have been significant fluctuations in the level of the water’s edge in the lake. Meanwhile, the rate of water volume change varied from 3.9 to –3.6 dm<sup>3</sup> per second. The reason for the negative water balance in March 2022 is formation of a ponor at the end of the winter of 2014, which subsequent expansion along with periodic overlapping by screes and microlandslides have led to complete disappearance of the lake. The proposed algorithm based on the usage of the Citizen science technologies (collection of amateur photo- and video- data), combined with usage of GIS-tools can be used for providing monitoring for water bodies.

**KEYWORDS:** lake, karst, photogrammetry, digital terrain model, geographic information system, environmental monitoring

### **ВВЕДЕНИЕ**

Уровень воды в карстовых озерах может существенно изменяться. При этом вода в озерных котловинах может полностью исчезнуть и вновь их наполнить. Феномен осушения и последующего наполнения озерных котловин не всегда связан со среднегодовым количеством атмосферных осадков, а зачастую зависит от режима карстовых вод [Белов и др., 2019]. Также не стоит исключать и влияние антропогенных факторов: изменения химического состава поверхностных, грунтовых и подземных вод в результате применения

---

<sup>1</sup> Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, 424000, Yoshkar-Ola, Russia; *e-mail*: [GoncharovEA@volgatech.net](mailto:GoncharovEA@volgatech.net)

<sup>2</sup> Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, 424000, Yoshkar-Ola, Russia; *e-mail*: [FadeevAN@volgatech.net](mailto:FadeevAN@volgatech.net)

<sup>3</sup> Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, 424000, Yoshkar-Ola, Russia; *e-mail*: [IvanovAA@volgatech.net](mailto:IvanovAA@volgatech.net)

<sup>4</sup> Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, 424000, Yoshkar-Ola, Russia; *e-mail*: [Marinellat@mail.ru](mailto:Marinellat@mail.ru)

на водосборной площади удобрений сельскохозяйственными производителями и в личных подсобных хозяйствах, загрязнения грунтовых вод хозяйственно-фекальными стоками (через негерметичные выгребные ямы), а также изменения гидрогеологических условий водозаборными скважинами (особенно в частном секторе).

Республика Марий Эл известна своими озерами, среди которых особое место занимают водоемы карстового происхождения. Гидрологической жемчужиной региона является озеро Морской глаз. На географической карте и в научных трудах оно известно с 1954 г. [Ступишин, 1967]. Однако с 2014 г. в озере стал существенно колебаться уровень воды, вплоть до полного исчезновения в 2022 г. Несмотря на популярность объекта среди туристов и включение его в 2019 г. в состав комплексного (ландшафтного) природного заказника республиканского значения «Шайра кундем – Сотнурская возвышенность», озеро не являлось объектом регулярного гидрологического и экологического мониторинга. В то же время в практике гидрологических исследований находят все более широкое применение данные фото- и видеосъемки, в т.ч. с использованием микродронов [Журавлев, 2016; Bandini et al., 2017; Анохин и др., 2019; Duan et al., 2021].

**Целью** данной работы стала оценка гидрологических характеристик водного объекта (на примере озера Морской глаз) и его водосборной площади, а также динамики гидрологических характеристик с помощью ГИС-инструментов и данных фото- и видеосъемки.

При этом ставились задачи:

1. Дать физико-географическую характеристику территории и объекта исследования и обобщить имеющиеся данные об озере.
2. Оценить площадь водосбора озера и охарактеризовать его гидрогеологические условия и хозяйственное использование.
3. Применить алгоритмы построения цифровых моделей местности (ЦММ) по данным съемки с микродронов и реконструкции изменений уровня уреза воды по разновременным фотоснимкам.
4. Рассчитать с использованием ЦММ и уровней уреза воды показатели, характеризующие водный баланс озера.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С помощью историко-географического подхода собраны максимально полные сведения об объекте исследования, установлен факт первого документального упоминания озера. При сборе фотоматериалов использована технология гражданской науки Citizen science: с помощью пользователей соцсетей были собраны фотографии озера с известными датами съемки за период с 2002 по 2022 гг.

Оценка водосборных площадей озера проведена с помощью сравнительного картографического и ландшафтно-гидрологического [Yasinskii et al., 2020] методов с использованием ГИС.

Разработка цифровых моделей местности и рельефа котловины озера выполнена на основе данных съемки микроквадрокоптера и фотограмметрической обработки снимков стандартными инструментами Agisoft Metashape и ГИС «Панорама». Уточнение высотных отметок проведено на основе данных полевой геодезической съемки с помощью безотражательного электронного тахеометра с определением координат по данным спутниковых измерений GNSS-приемником.

Реконструкция уровней уреза воды озера производилась на основе визуального сопоставления фотографий разных лет в Agisoft Metashape на цифровой модели местности. По урезам воды в ГИС «Панорама» на основе модуля «Расчета земляных работ» рассчитывался объем воды, находившейся в озере на дату определения уреза воды.

Исследования выполнены в лаборатории геоинформационных систем ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» ПГТУ.

**Объект исследования.** Озеро Морской глаз – озеро карстово-провального происхождения – расположено в бассейне реки Илеть на склоне северной экспозиции Сотнурской возвышенности южной оконечности Марийско-Вятского Увала у д. Шарибоксад Волжского района Республики Марий Эл. По физико-географическому районированию территория исследований относится к Илетскому возвышенно-равнинному южнотаежному району с современным развитием карста Южнотаежной области возвышенности Вятского увала [Васильева, 1979].

**Геология.** Сотнурская возвышенность сложена пермскими породами татарского и казанского ярусов. Татарский ярус представлен маломощными (до 0,5 м) известняками, мергелями, глинами, супесями, песчаниками, перекрытыми четвертичными пылеватыми покровными суглинками мощностью до 1 м. В основании возвышенности находятся толщи известняково-доломитовых пород казанского яруса – зона древнего и современного карста (рис. 1). Глубина залегания кристаллического фундамента – 1800–1900 м.

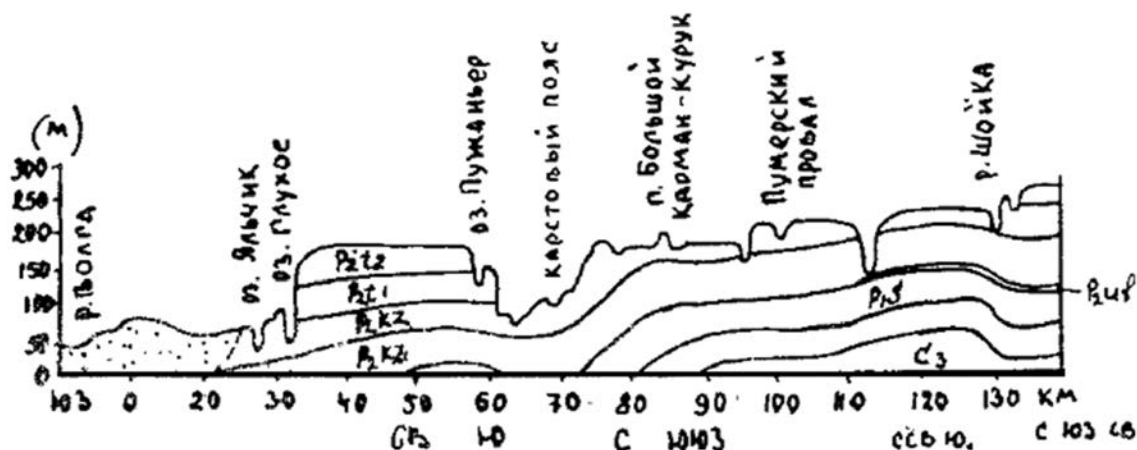


Рис. 1. Геолого-геоморфологический разрез южной зоны Марийско-Вятского увала [Русских, Иванов, 1992]

Fig. 1. Geological and geomorphological section of the southern zone of the Mariysko-Vyatka ridge [Russkikh, Ivanov, 1992]

Региональным водоупором является гипсо-ангидритовая толща сакмарского яруса нижнепермского возраста. В разрезе зоны активного водообмена прослеживаются следующие основные гидрогеологические подразделения (сверху–вниз): водоносная локально слабоводоносная верхнеуржумская терригенно-карбонатная свита –  $P_2u_2$  (водовмещающие породы представлены известняками кавернозными, трещиноватыми, песчаниками, песчаными алевролитами; подстилающий водоупор – глины и глинистые мергели нижнеуржумской водоносной свиты), водоносная локально слабоводоносная нижнеуржумская карбонатно-терригенная свита –  $P_2u_1$  (водовмещающие породы – кавернозные, неравномерно трещиноватые известняки, трещиноватые мергели, слабые, трещиноватые песчаники, песчанистые и трещиноватые алевролиты; подстилающий водоупор – карбонатно-глинистые, иногда загипсованные, пачки пород или верхнеказанские монолитные карбонатные породы и гипсы), водоносная локально слабоводоносная верхнеказанская терригенно-карбонатная

свита –  $P_2kz_2$  (водовмещающие породы – кавернозные, макропористые, неравномерно трещиноватые, участками закарстованные известняки, трещиноватые мергели, слабые, трещиноватые песчаники, песчанистые и трещиноватые алевролиты; подстилающий водоупор – монолитные карбонатные породы с гипсами), водоносная нижнеказанская терригенно-карбонатная свита –  $P_2kz_1$  (водовмещающие породы – трещиноватые, кавернозные известняки и трещиноватые песчаники)<sup>1</sup>.

Воды поровые, трещинные, трещинно-поровые и карстово-трещинные, безнапорные. По химическому составу подземные воды гидрокарбонатные магниево-кальциевые, с минерализацией 0,2–0,5 г/л и жесткостью 1,6–7,3 мг-экв/л; воды нижнеказанской терригенно-карбонатной свиты – гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные, гидрокарбонатно-сульфатные с минерализацией 0,3–1 г/л.

Питание водоносных свит происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков в местах выхода соответствующих отложений на дневную поверхность, а также за счет перетока вод из вышележащих водоносных подразделений. Разгрузка подземных вод происходит в долину реки Илеть. Модуль подземного стока – 1,5 л/с км<sup>2</sup>.

**Рельеф.** Сотнурская возвышенность – эрозионно-денудационная равнина, расчлененная овражно-балочной сетью (рис. 2). Преобладают плакорные поверхности с уклоном 0,5–1°, плавно переходящие в пологовыпуклые пологие склоны с крутизной 2,5–3° [Васильева, 1979].

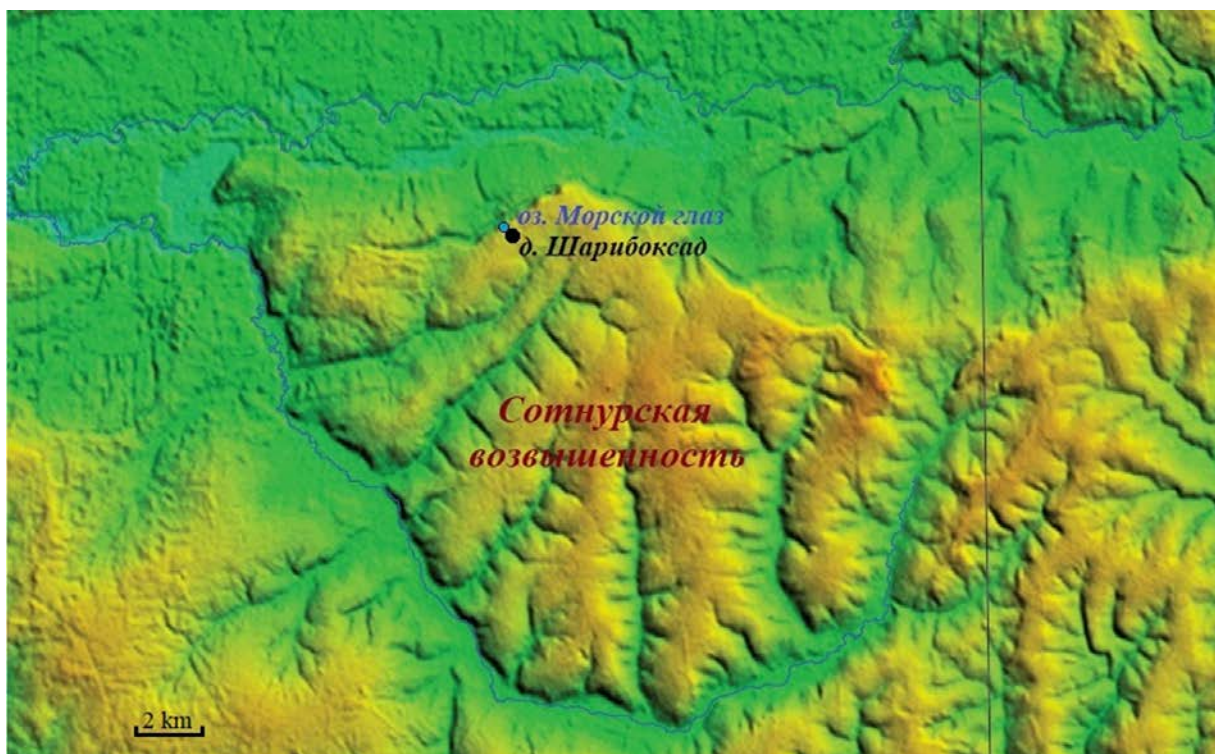


Рис. 2. Сотнурская возвышенность – цифровая модель местности по данным SRTM

Fig. 2. Sotnur Upland – digital terrain model based on SRTM data

<sup>1</sup> Эколого-географический атлас Республики Марий Эл. Электронный ресурс: <https://xn--12-glci9b.xn--p1ai/atlas/> (дата обращения 24.04.2022).

<sup>2</sup> Государственная геологическая карта. Лист О(38)39, масштаб 1:1000 000. Электронный ресурс: [http://www.geolkarta.ru/list\\_200.php?idlist=O\(38\)39](http://www.geolkarta.ru/list_200.php?idlist=O(38)39) (дата обращения 24.04.2022).

Абсолютные отметки Сотнурской возвышенности составляют в среднем 170–190 м, достигая максимальных значений 228 м на востоке возвышенности (Янга-Аульская тектоническая структура). Уровень местного базиса эрозии 70 м (р. Илеть). Глубина расчленения территории составляет 100–150 м. Густота овражно-балочной сети – 600–1300 м/км<sup>2</sup>, на отдельных водоразделах достигает 1600 м/км<sup>2</sup>. Рельеф склонов осложнен ложбинами стока, глубокими (до 18 м) балками [Васильева, 1979]. Северный крутой склон возвышенности (35–40°) осложнен обрывистыми откосами, оползневыми формами (террасы, в нижней части – бугристые оползневые плащи) и карстовым рвом с плоским дном и карстовыми озерами. Противоположный берег карстового рва представлен пологонаклонным склоном. Нижняя денудационная равнина имеет множество карстовых воронок, расчленяется логами с широким дном глубиной до 8–10 м.

**Карст.** Территория исследования по районированию [Чикишев, 1978] относится к Илеть-Казанскому карстовому району Средневожско-Камской карстовой области. Карстуются карбонатные и карбонатно-сульфатные породы казанского возраста. Развита преимущественно воронки просасывания диаметром 100 м и глубиной 20 м. Иногда они располагаются большими группами. При слиянии карстовых воронок образуются рвы, склоны и дно которых осложнены воронками меньших размеров. Самым крупным карстовым рвом на Русской равнине является карстовый ров, расположенный вдоль северного склона Сотнурской возвышенности (рис. 3).

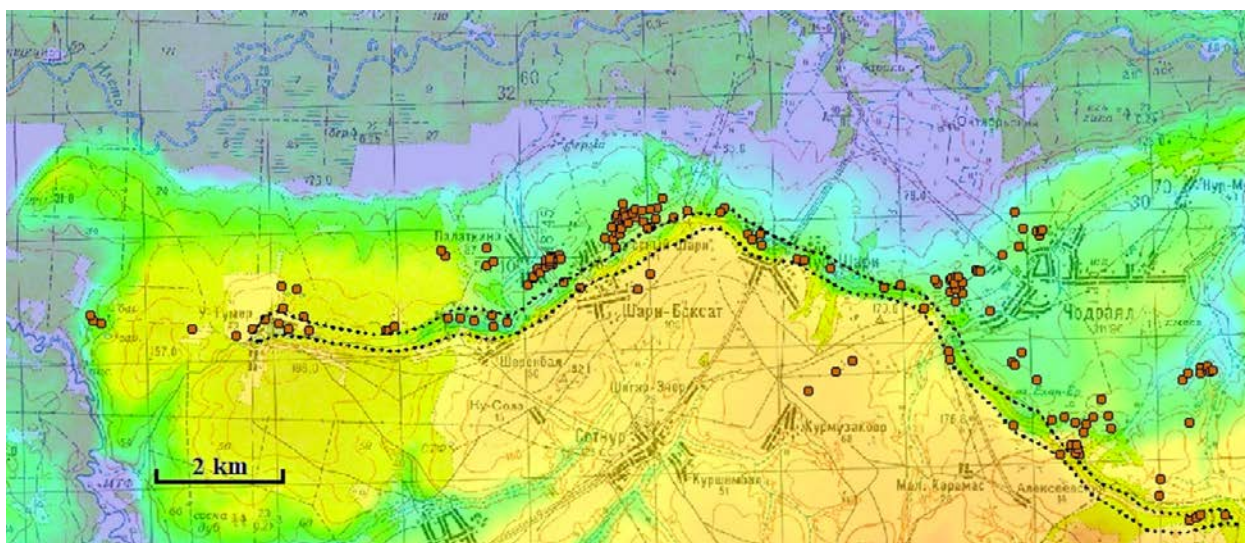


Рис. 3. Локализация карстовых форм рельефа вдоль северного склона Сотнурской возвышенности

Fig. 3. Localization of karst landforms along the northern slope of the Sotnur Upland

Его длина составляет около 16 км, ширина – 200–500 м и глубина – до 85 м. На дне и склонах рва широко распространены воронки и озера.

**Климат** умеренно континентальный. Количество осадков в среднем бывает 500–520 мм/год (рис. 4), в теплый период – 340–360 мм. Продолжительность теплого периода – 213–222 дня, устойчивого снежного покрова – 150–155 дней. Высота снежного покрова – 35–50 см. Среднегодовая температура составляет +4,0 °С. Среднемесячная температура воздуха в январе фиксируется на отметке –11,0 °С, в июле поднимается до +19,5 °С. Сумма активных температур – 2350 °С.

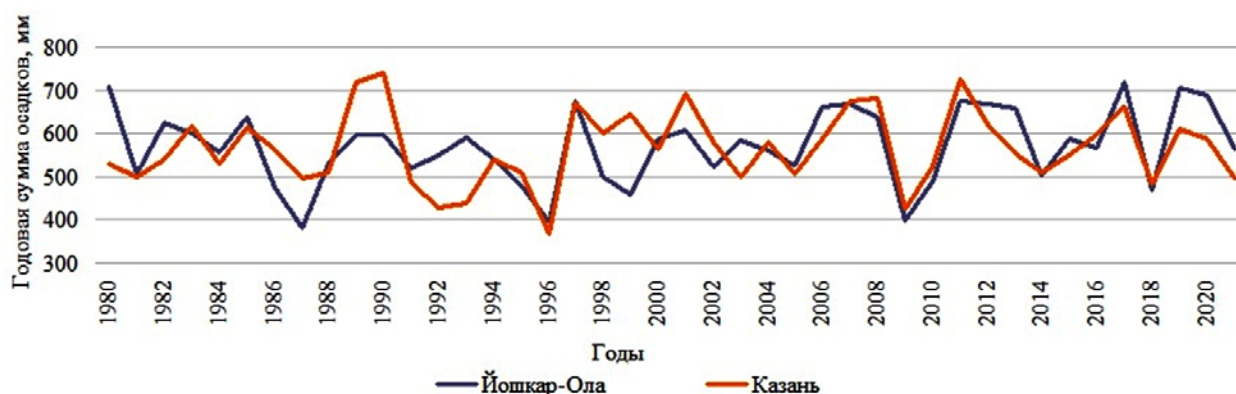


Рис. 4. Динамика атмосферных осадков (мм) по ближайшим к объекту исследования метеостанциям<sup>1</sup>

Fig. 4. Atmospheric precipitation dynamics (mm) at the nearest meteorological stations to the object of study<sup>1</sup>

**Почвы** на плакорах – дерново-слабо- и среднеподзолистые суглинистые, на крутых склонах – дерново-карбонатные суглинистые, по днищу карстового рва – дерново-торфянистые, на пологих склонах нижней денудационной равнины – дерново-слабоподзолистые супесчаные.

**Растительность** на плакорах представлена агроценозами, на крутых склонах – хвойно-широколиственными лесами с участием ели, клена, дуба, липы, березы и осины, по днищу карстового рва – луговая и болотная растительность, на пологих склонах нижней денудационной равнины – луговые агроценозы.

**Изученность вопроса.** Озеро Морской глаз (по-марийски Мўшыл – воронка, провал, яма) известно с середины XIX века<sup>2</sup>. Впервые озеро было исследовано в 1954 г. А.В. Ступишиным [Ступишин, 1967]: озеро охарактеризовано как «молодое», находится в провале в зоне высокого уступа до 85–90 м высоты, очаг провала расположен в карбонатных отложениях верхнеказанского подъяруса; морфометрические характеристики озера: угол склона берегов – 45°, длина озера – 50 м, максимальная ширина – 45 м, максимальная глубина – 35,5 м, площадь – 0,2 га; прозрачность воды – 5,5 м; из озера вытекал ручей с дебитом до 10 л/с; вода использовалась для питьевых нужд (рис. 5). Гидрохимический анализ придонной пробы воды (16.04.1954) показал содержание гидрокарбонат-иона – 207,4 мг/л, сульфат-иона – 9,87 мг/л, хлорид-иона – 9,67 мг/л, ион кальция – 53,91 мг/л, ион магния – 3,93 мг/л, отсутствие сероводорода, аммиака и железа, общая минерализация – 284,74 мг/л, т.е. вода в озере гидрокарбонатно-кальциево-магниевая. Это позволило сделать вывод [Ступишин, 1967] о наполнении озера нисходящими источниками, питаемыми безнапорными водами песчаников и известняков татарского яруса, а также атмосферных осадков.

<sup>1</sup> Специализированные массивы для климатических исследований. Электронный ресурс: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.shtml> (дата обращения 24.04.2022).

<sup>2</sup> Списки населенных мест Российской империи, составленные и издаваемые Центральным статистическим комитетом Министерства внутренних дел. Электронный ресурс: <http://elib.shpl.ru/ru/nodes/16154-vyp-14-kazanskaya-guberniya-po-svedeniyam-1859-goda-1866> (дата обращения 24.04.2022).

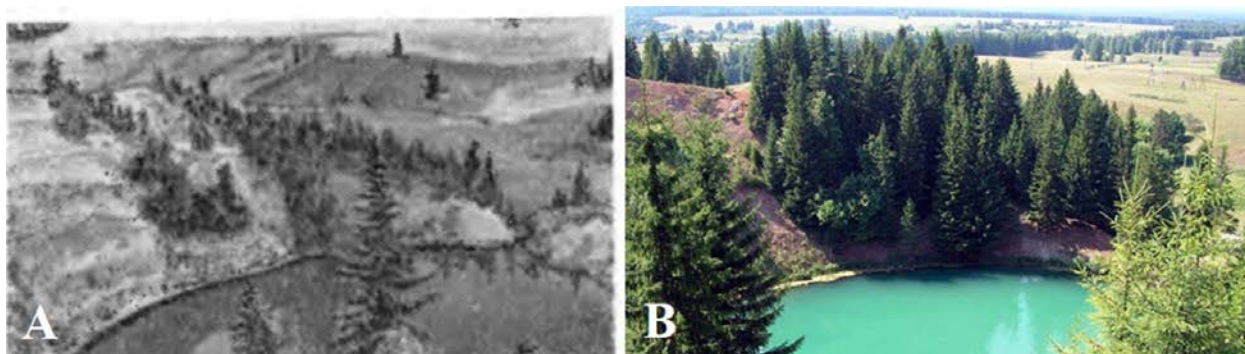


Рис. 5. Динамика береговой растительности:  
 А – 1954 г. [Ступишин, 1967]; В – 2008 г. (фото авторов)

Fig. 5. Vegetation dynamics on the shores of the lake:  
 А – 1954 [Stupishin, 1967]; В – 2008 (authors' photo)

В рамках экспедиции авторов статьи в 1999 г. на озере Морской глаз проводились измерения расхода поступающей (с родниками) и исходящей (вытекающий ручей) воды. Объемным методом были произведены замеры расхода, результаты которого сведены в табл. 1. Также был проведен промер глубин, максимальная глубина составила 34,5 м.

Табл. 1. Результаты измерений расходов воды в 1999 г.  
 Table 1. Results of measurements of water discharges in 1999

Гидрологический объект	Расход воды, л/с					Средний расход, л/с
	23.07.99	24.07.99	25.07.99	26.07.99 (после дождя)	27.07.99	
Впадающий родник 1	0,42	0,55	0,50	1,02	0,68	0,64
Впадающий родник 2	0,28	0,43	0,37	0,76	0,5	0,47
Вытекающий ручей	0,42	0,51	0,47	0,87	0,6	0,57

Таким образом, потеря воды за счет испарения и донной фильтрации составляла 0,5–0,6 л/с.

В 2008 г. сотрудниками МарГУ проводились гидробиологические и гидрологические исследования: зафиксирована максимальная глубина – 41,7 м, прозрачность воды – 8 м [Тимофеева, Ильин, 2009].

С 2014 г. уровень воды в озере начал значительно колебаться. В работе [Журавлев, Фадеев, 2015] указывается, что 21.05.2013 г. при нормальном уровне воды<sup>1</sup> озеро имело следующие морфометрические характеристики: длина – 60,5 м, максимальная ширина – 59,8 м, площадь – 0,28 га, глубина – 42,5 м; 05.06.2014 г. зафиксировано падение уровня воды относительно нормального уровня, оно составило 8,5 м, при этом длина сократилась до 44,3 м, максимальная ширина – до 42,6 м, площадь – до 0,15 га; к 01.07.2014 г. падение уровня воды составило 12,2 м, длина сократилась до 40,6 м, максимальная ширина – 34,9 м, площадь – до 0,11 га.

<sup>1</sup> Под «нормальным» уровнем воды в озере в данной работе понимается уровень, при котором озеро является сточным (из озера вытекает ручей), по данным геодезической съемки 2022 г. высотная отметка уреза воды при «нормальном» уровне составляет 121,5 м.



В 2016 г. озеро стало восстанавливаться и в 2017–2018 гг. практически восстановило свой объем. С мая 2019 г. уровень снова стал медленно понижаться, и в марте 2022 г. озеро практически исчезло.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Оценка состояния водосборной площади.** Анализ данных геологического строения и рельефа местности, совмещение геологических и топографических карт в ГИС позволило определить наклоны геологических слоев (так, падение основания верхней подсерии уржумской серии нижнего подъяруса татарского яруса пермской системы ( $P_2ur_2$ ) в районе водосборной площади изучаемого озера составляет 16–21 м/км в северо-западном направлении), и водосборную площадь озера, включающую поверхностную и подземную составляющую – см. рисунок 6.

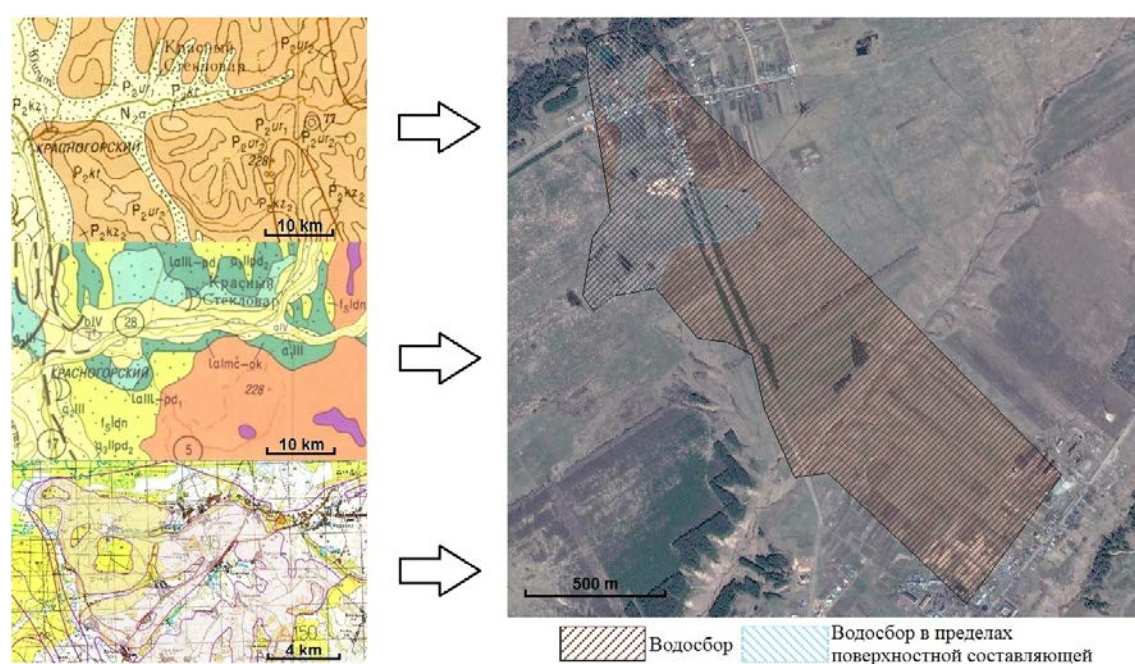


Рис. 6. Определение водосборной площади: фрагменты геологических карт, совмещение геологических контуров с топокартой и космическим снимком<sup>1</sup>

Fig. 6. Determination of watershed area: fragments of geological maps, combination of geological contours with a topographic map and a satellite image<sup>1</sup>

Данные оценки состояния водосборных площадей приведены в табл. 2

Водосборный бассейн озера, с учетом подземной составляющей, не превышает 1,3 км<sup>2</sup>, при этом основное питание озера за счет поверхностного и грунтового стока формируется на площади около 0,6 км<sup>2</sup>. Древесная растительность занимает 4–8 % территории, земли сельских населенных пунктов – 21–27 % (постройки, асфальтированные и грунтовые дороги, огороды), нарушенные земли (овраги, обрывистые берега провала озера) занимают 5–9 %. На сельскохозяйственные угодья приходится 59–65 % территории. В зоне поверхностного водосбора сосредоточено 45 индивидуальных жилых домов

<sup>1</sup> SASGIS. Веб-картография и навигация. Электронный ресурс: <http://www.sasgis.org/sasplaneta/> (дата обращения 24.04.2022).

(ИЖД) д. Шарибоксад с локальной канализацией. Также стоит отметить наличие частных водозаборных скважин и скважину централизованного водозабора в с. Сотнур на юго-восточной окраине водосбора.

Табл. 2. Структура земельных угодий на водосборной площади

Table 2. Land structure in the catchment area

Показатель	Водосбор	
	в пределах поверхностной составляющей	полный (поверхностная и подземная составляющая)
Общая площадь, км <sup>2</sup> (%)	0,276 (100)	1,301 (100)
Древесная растительность, км <sup>2</sup> (%)	0,021 (7,6)	0,055 (4,2)
Сельскохозяйственные угодья, км <sup>2</sup> (%)	0,163 (59,1)	0,840 (64,6)
Земли сельских населенных пунктов, км <sup>2</sup> (%)	0,075 (27,2)	0,277 (21,3)
Дороги с твердым покрытием, км <sup>2</sup> (%)	0,004 (1,4)	0,018 (1,4)
Нарушенные земли, км <sup>2</sup> (%)	0,013 (4,7)	0,111 (8,5)
Земли ООПТ, км <sup>2</sup> (%)	0,027 (9,8)	0,027 (2,1)
Количество ИЖД, ед.	29	45

**Определение на основе ЦММ и фотоматериалов показателей, характеризующих водный баланс озера.** За основу сопоставления данных различных лет взяты данные, полученные в 2016 и 2022 гг. в ходе полевых выездов. Проведена вертикальная съемка с микродрона озера Морской глаз и д. Шарибоксад. Увязка данных производилась на основе 6 опорных точек с определением координат и высот GNSS-приемником. Данные опорные точки являлись основой для построения цифровой модели местности на основе фотограмметрической обработки снимков стандартными инструментами в Agisoft Metashape. Полученная цифровая модель местности и ортофотоплан 2016 г. стали основой для определения высотных отметок урезов воды, уровней родников, а также для определения начальной высоты взлета квадрокоптеров в любительских съемках и последующих корректировок этих съемок в Agisoft Metashape и ГИС «Панорама» (рис. 7 и 8).

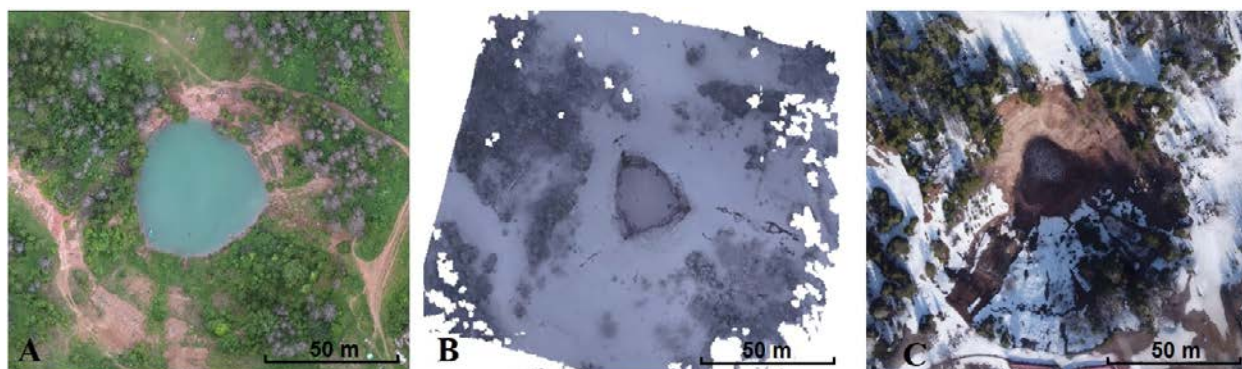


Рис. 7. Скриншоты ортофотопланов озера Морской глаз:

A – 2016 г.; B – 04.02.2022 г.; C – 13.04.2022 г.

Fig. 7. Screens of orthophotomaps of Morskoy Glaz lake:

A – 2016; B – 04/02/2022; C – 13/04/2022

На рисунке 7 представлены скриншоты ортофотопланов по озеру Морской глаз за разные периоды времени:

А – июнь 2016 г., обработка видеосъемки микродрона в Agisoft Metashape на основе определения координат наземных маркеров GNSS-приемников в МСК-12 (1 зона) и получение ортофотоплана с разрешением 6 см/рх;

В – февраль 2022 г., обработка видеосъемки микродрона в Agisoft Metashape в WGS-84 и получение ортофотоплана с разрешением 2 см/рх;

С – апрель 2022 г., обработка видеосъемки микродрона в Agisoft Metashape в WGS-84 и получение ортофотоплана с разрешением 2 см/рх.

В ходе обработки данных видеосъемки в Agisoft Metashape полученные цифровые модели местности котловины озера Морской глаз представлены на рисунке 8.

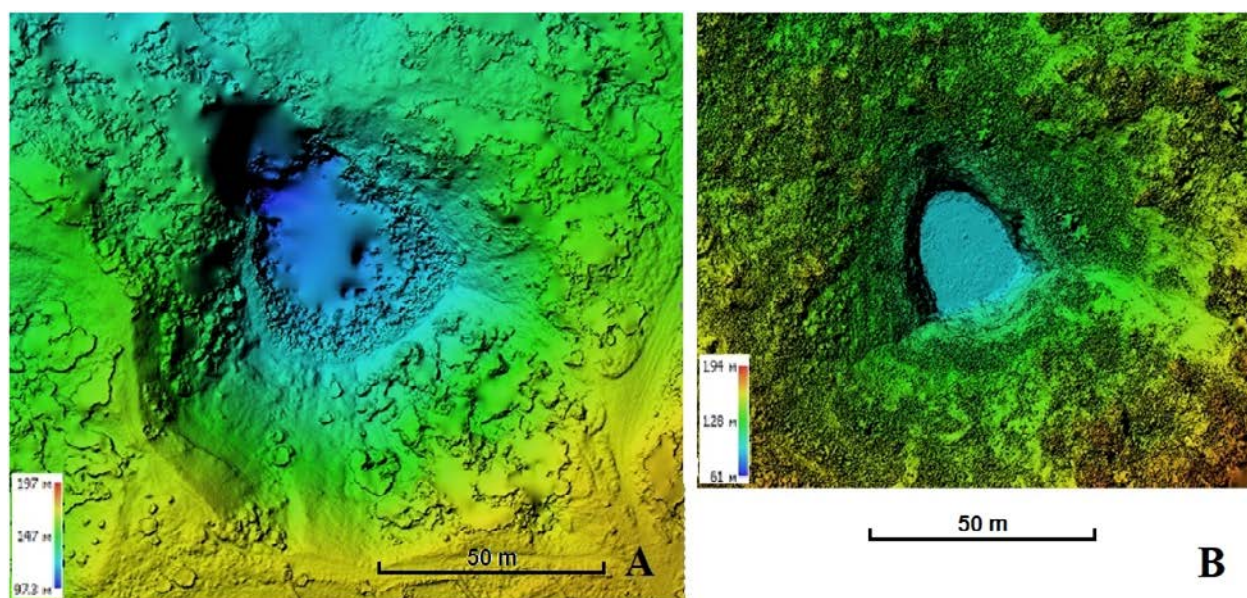
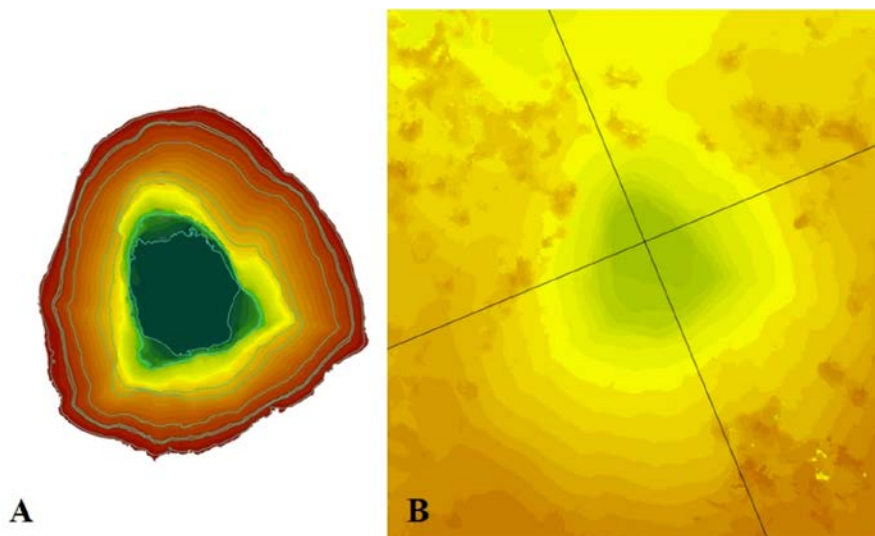


Рис. 8. Цифровые модели местности озера Морской глаз: А – 2016 г.; В – 2022 г.  
 Fig. 8. Digital terrain models of Morskoy Glaz lake: A – 2016, B – 2022

Сложность сопоставления данных обработки в Agisoft Metashape любительской съемки 2022 и 2016 гг. заключалась в отсутствии маркеров для корректировки данных видеосъемки и наличии снежного покрова в первом случае. Но обнажившаяся часть котловины озера 04.02.2022 г. позволила микродрону спуститься в котловину и произвести ее видеосъемку. В качестве корректировки данных 2022 г. послужили природные объекты – древесные насаждения. Это позволило скорректировать местоположение ортофотоплана и данных по цифровой модели местности в ГИС «Панорама». Уточнение высотных отметок проведено на основе данных полевой геодезической съемки с помощью безотражательного электронного тахеометра с определением координат по данным спутниковых измерений GNSS-приемником.

На основе сопоставления и совмещения цифровых моделей местности 2016 и 2022 гг. (при этом был использован материал любительской съемки микродроном DJI Mini 2 04.02.2022 г., 01.04.2022 г. и 13.04.2022 г.) были получены цифровые модели рельефа с растровой подложкой из фотоснимков обнажившейся части котловины озера по данным на 01.04.2022 г. и 13.04.2022 г. (рис. 9).



*Рис. 9. Матрица высот обнажившейся котловины озера Морской глаз с урезами воды:  
A – 01.04.2022 г.; B – 13.04.2022 г.*

*Fig. 9. DEM of the exposed basin of Morskoy Glaz lake with water edges:  
A – 01/04/2022; B – 13/04/2022*

С помощью цифровой модели рельефа с растровой подложкой по состоянию объекта исследования на 01.04.2022 и совмещения с ней серии фотографий берегов определяли уровни водоносных горизонтов по выходу грунтовых и подземных вод: как на склонах озера (постоянно действующие родники), так и в обнажившейся котловине озера. Определение уровня происходило на основе установки маркеров в Agisoft Metashape на цифровой модели, вследствие чего были получены координаты и высоты маркеров (рис. 10 и 11).



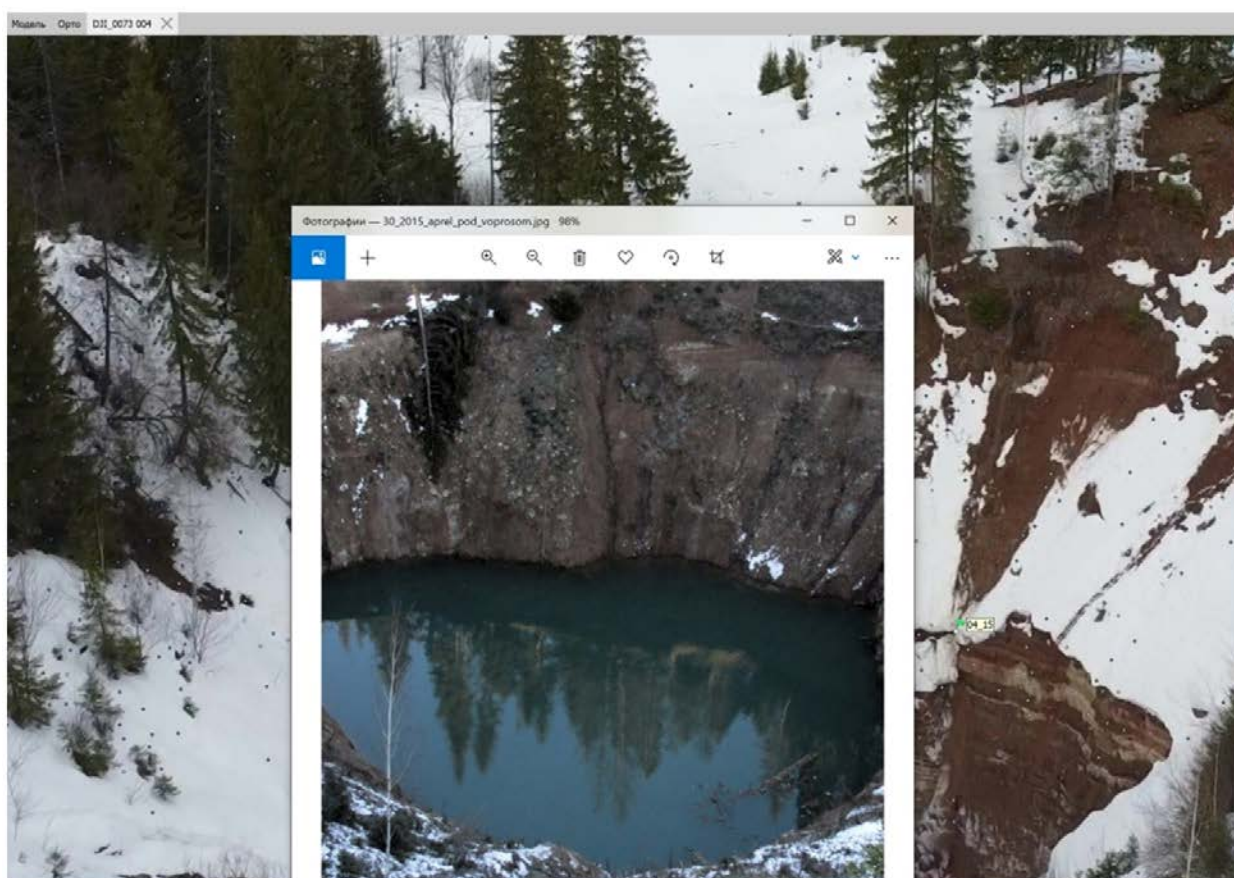
*Рис. 10. Уровни тальвега ручья, водоносных горизонтов, уровня воды на цифровой модели рельефа с растровой подложкой*

*Fig. 10. Thalweg levels of a stream, aquifers, water level on a digital elevation model with a raster image*

В результате были определены уровни грунтовых вод (152 м – уровень основного родника) и подземных вод (119 м, 114 м, 103 м), питающих озеро, которые были использованы для оценки подземной составляющей водосборной площади с учетом падения геологических слоев.

Вплоть до 01.04.2022 г. не наблюдалось активных разрушений берегов котловины из-за ее расположения на склоне северной экспозиции, поэтому модель 01.04.2022 г. была также использована для реконструкции динамики уровней уреза воды, объемов воды и скорости изменения объема воды в озере.

Определение динамики уреза воды за 2013–2022 гг. производилось так же на основе визуального сопоставления надводных фотографий разных лет, собранных с помощью пользователей соцсетей, и поиска на цифровой модели рельефа с растровой подложкой озера характерных геологических пластов и точек (рис. 11).



*Рис. 11. Определение уреза воды совмещением фотографии и ЦМР*

*Fig. 11. Determination of the water edge by combining photographs and DEM*

На основе модуля «Расчет земляных работ» в ГИС «Панорама» рассчитывался объем воды, находившейся в озере на дату определения уреза воды (рис. 12). Следует отметить, что объем воды в озере на 01.04.2022 г. условно принят за ноль.

Реконструированный полный объем воды в озере при урезе воды на высотной отметке 121,5 м и при параметрах котловины озера ЦМР на 01.04.2022 составил 53 185 м<sup>3</sup>.

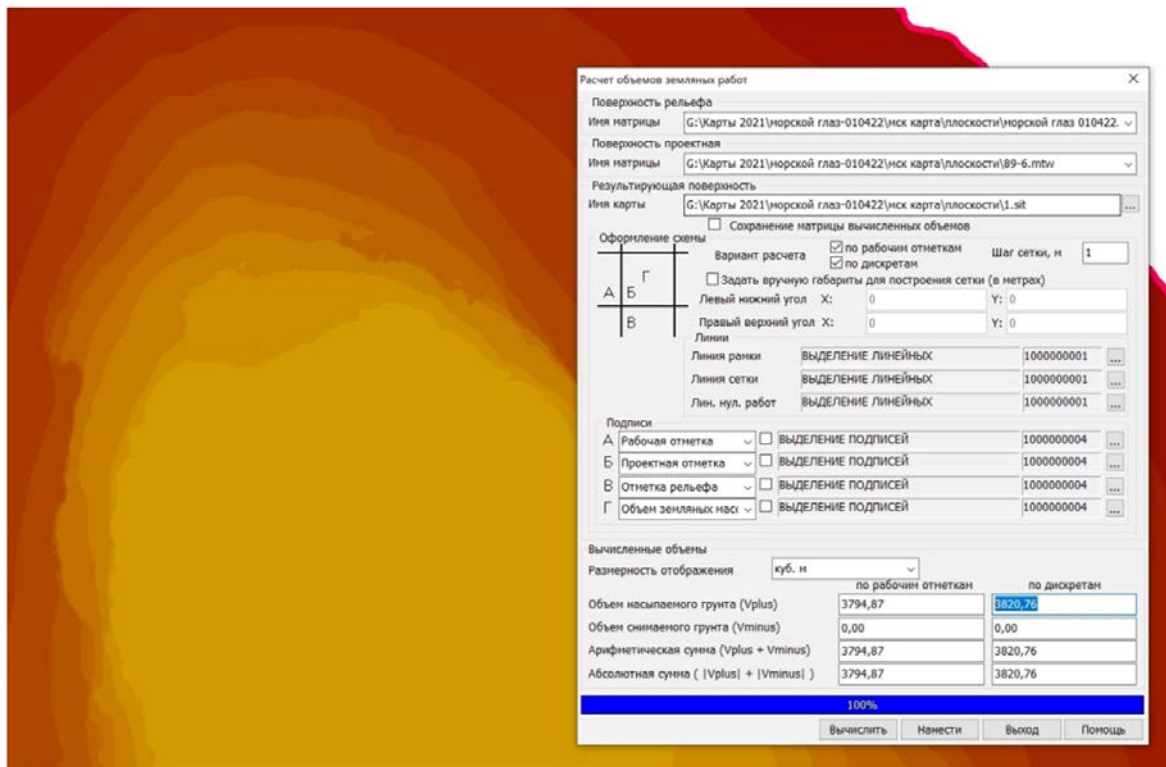


Рис. 12. Определение объема воды в озере на основе сопоставления матриц высот в ГИС «Панорама»

Fig. 12. Determining the volume of water in the lake based on the comparison of DEMs in GIS «Panorama»

Сопоставление моделей 1 и 13 апреля позволило оценить изменения профиля котловины (рис. 13), которые соответствуют периоду активного разрушения берегов провала за счет оттаивания грунта и увеличения прихода грунтовых и подземных вод после снеготаяния, что привело к заполнению дна котловины слоем грунта мощностью примерно 6 м.

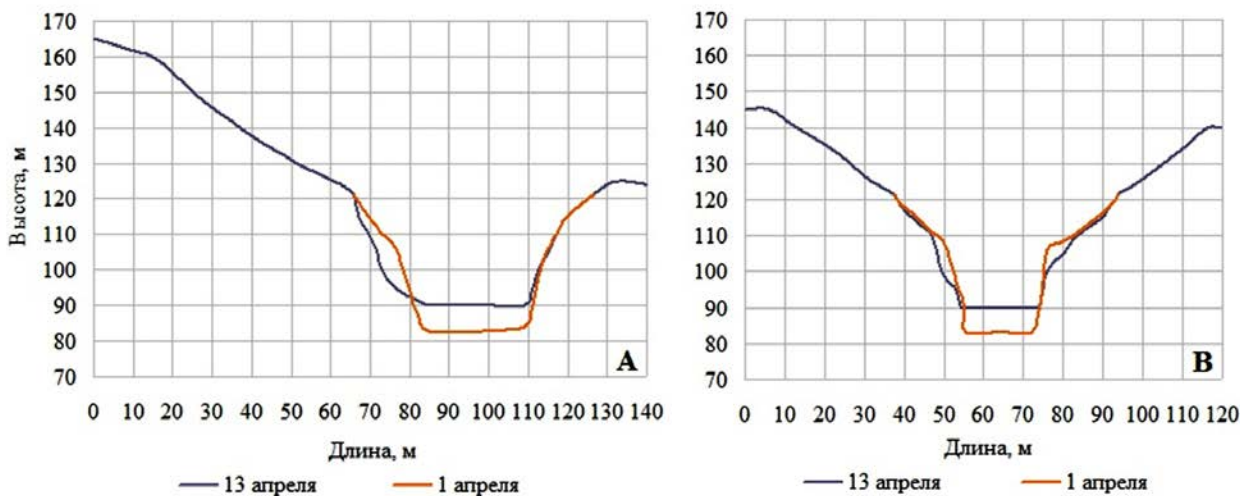


Рис. 13. Профили котловины озера 01.04.2022 г. и 13.04.2022 г.:

A – профиль с ЮЮВ на ССЗ; B – профиль с ЗЮЗ на ВСВ

Fig. 13. Profiles of the lake basin on 04/01/2022 and 04/13/2022:

A – profile from SSE to CVD; B – profile from WSW to ENE

Результаты реконструкции динамики гидрологических параметров озера представлены на рисунках 14 и 15.

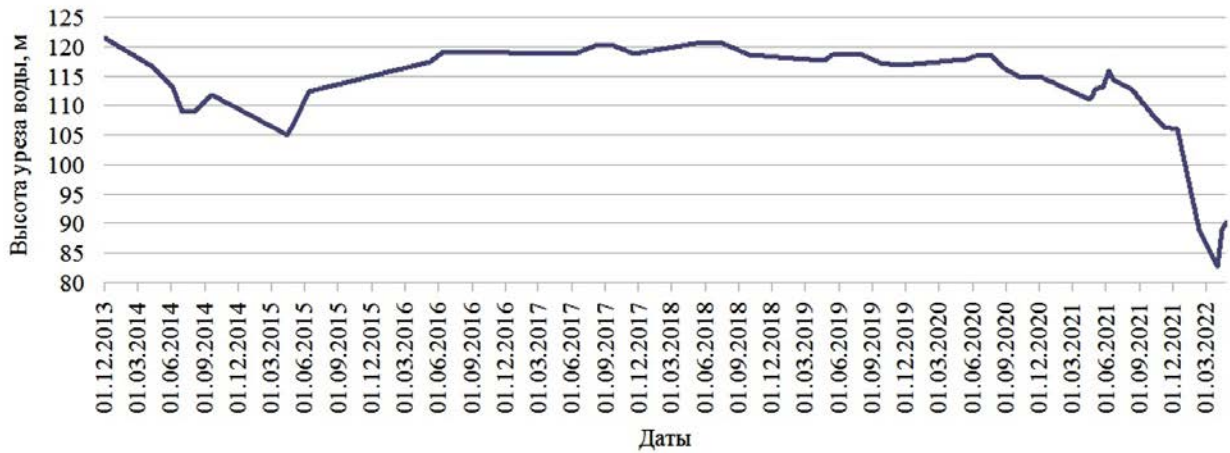


Рис. 14. Динамика уровня воды в озере  
 Fig. 14. Dynamics of the water level in the lake



Рис. 15 Динамика скорости изменения объема в озере  
 Fig. 15 Dynamics of the rate of volume change in the lake

1 декабря 2013 – дата последнего фотодокумента, зафиксировавшего уровень озера, когда оно было сточным. Эта дата условно принята за дату начала падения уровня воды.

Анализ данных показывает, что в гидрологическом режиме озера пики прироста воды приходятся на май – начало июня, что обусловлено приходом с поверхностным, грунтовым и подземным стоком талых вод. После этого наступают стабильные периоды снижения запаса воды. Исключение составляют 2014 и 2017 гг., в августе–сентябре которых наблюдался прирост объема воды.

Скорость изменения объема воды в озере менялась от 3,9 до  $-3,6$   $\text{дм}^3/\text{с}$ . Зимой 2013–2014 гг. озеро «сбросило» 15,5 тыс.  $\text{м}^3$ . В апреле–мае 2014 г. на фоне поступления талых вод озеро дополнительно потеряло 8 тыс.  $\text{м}^3$ . Во второй половине июня, после схода талых вод, значительно возросла скорость убыли воды до  $-3,1$   $\text{дм}^3/\text{с}$  и озеро за 26 дней потеряло еще 7 тыс.  $\text{м}^3$ . После этого в августе–сентябре 2014 г. отмечался прирост запасов воды в озере.

За зимний период 2014–2015 гг. озеро вновь «сбросило» 10 тыс. м<sup>3</sup>. На фоне роста с апреля 2015 г. запасов воды в озере и стабилизации уровня в 2017–2018 гг. следует отметить тенденцию на снижение скорости прироста запасов воды в озере, что свидетельствует об увеличении донной фильтрации. Следующая критическая ситуация возникла в начале августа 2020 г., когда озеро за 27 дней «сбросило» 5,5 тыс. м<sup>3</sup>. В первой половине июня 2021 г. увеличение объема воды в озере со скоростью 3,9 дм<sup>3</sup>/с за счет талых вод резко сменилось на убыль с максимальной за рассматриваемый период скоростью –3,6 дм<sup>3</sup>/с – озеро за 12 дней обмелело почти на 4 тыс. м<sup>3</sup>, далее скорость убыли замедлилась, однако, в январе 2022 г. вновь усилилась до –2,8 дм<sup>3</sup>/с, в результате чего озеро за 1,5 месяца «сбросило» 15 тыс. м<sup>3</sup> и практически исчезло.

Данную динамику и причину исчезновения озера можно объяснить образованием в конце зимы – начале весны 2014 г. понора, который периодически закрывался грунтом осыпей, приносимых весной тальми водами, и микрооползней, происходивших на обнаженных в результате понижения уровня воды склонах озера. Резкий уход воды летом 2021 г. и усиление затем донной фильтрации осенью могут быть связаны с расширением понора, что при нехватке свободного грунта в зимний период привело к полной потере воды. В настоящее время дно перекрыто значительной толщиной грунта, следует ожидать постепенного наполнения чаши озера.

## ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работы обобщен литературный и картографический материал, характеризующий объект и территорию исследования – озеро Морской глаз и его водосборную площадь. Несмотря на популярность объекта исследования среди туристов и включение его в состав комплексного природного заказника республиканского значения, озеро не являлось объектом регулярного гидрологического и экологического мониторинга.

На основе данных разновременной съемки микродронами с геодезической привязкой базовых точек с использованием инструментов Agisoft Metashape и ГИС «Панорама» разработаны цифровые модели местности и рельефа котловины озера.

С помощью совмещения съемок микродрона и цифровой модели местности определены уровни водоносных горизонтов, что позволило вычислить с учетом геологического строения местности водосборную площадь озера и провести на основе ландшафтно-гидрологического метода анализ ее состояния и хозяйственного использования.

Водосборный бассейн озера, с учетом подземной составляющей, не превышает 1,3 км<sup>2</sup>, при этом основное питание озера за счет поверхностного и грунтового стока формируется на площади около 0,6 км<sup>2</sup>. Древесная растительность занимает 7 %, земли сельских населенных пунктов – 26 %, нарушенные земли – 2 %, сельскохозяйственные угодья – 64 % территории водосбора, формирующего поверхностную составляющую стока в озеро. Здесь сосредоточено 45 индивидуальных жилых домов с локальной канализацией, а также частные водозаборные скважины.

С использованием фотоматериалов озера, предоставленных пользователями соцсетей, а также цифровой модели местности в Agisoft Metashape выполнена реконструкция динамики уровней уреза воды озера за 2013–2022 гг., что позволило рассчитать в ГИС «Панорама» объемы воды озера на конкретные календарные даты и оценить скорости изменения объема воды.

Использование инструментов ГИС и данных фото- и видеосъемки позволило реконструировать динамику озера за последние 10 лет и сделать следующие основные выводы.

В гидрологическом режиме озера пики прироста воды приходятся на май – начало июня, т.е. основным источником питания озера являются талые воды.



С зимы 2014 г. начались значительные колебания уровня уреза воды в озере. При этом скорость изменения объема воды в озере менялась от 3,9 до  $-3,6 \text{ дм}^3/\text{с}$ . С июня 2015 г. на фоне наполнения чаши озера и стабилизации уровня вод в 2017–2018 гг. начала формироваться тенденция на снижение скорости прироста запасов воды в озере с периодическими резкими сбросами, частично компенсируемыми весенним грунтовым и подземным стоком, что в конечном итоге привело к полному уходу воды и усилению эрозии берегов.

Данную динамику можно объяснить образованием понора и последующим его расширением в конце зимы – начале весны 2014 г. Понор периодически закрывался грунтом осыпей и микроползней, происходивших на обнаженных в результате понижения уровня воды склонах озера.

Предложенный алгоритм на основе использования технологий Citizen science (сбора данных любительской фото- и видеосъемки) в сочетании с инструментами ГИС может быть использован для мониторинга водных объектов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анохин В.М., Дудакова Д.С., Дудаков М.О. Геоморфология и типизация берегов Ладожского озера по данным съемки беспилотного летательного аппарата. Геоморфология. 2019. № 1. С. 25–37. DOI: 0.31857/S0435-42812019125-37.
2. Белов К.В., Игнатов П.А., Горюнов Е.Ю. Режим карстовых и ледниковых озер карбонового плато Тихвинской гряды северо-запада Русской платформы. Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 2. С. 21–29. DOI: 10.31857/S0869-78092019221-29.
3. Васильева Д.П. Ландшафтная география Марийской АССР. Йошкар-Ола: Марийское книжное издательство, 1979. 136 с.
4. Журавлев А.И. Создание матрицы глубин гидрографического объекта с применением методики фотофиксации промерной вертикали. Современные научные исследования и инновации. 2016. № 7. Электронный ресурс: <https://web.snauka.ru/issues/2016/07/69267> (дата обращения 01.04.2022).
5. Журавлев А.И., Фадеев А.Н. Получение и обработка морфометрических характеристик озера Морской глаз. Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. 2015. Ч. 5. С. 215–217.
6. Русских А.В., Иванов А.Д. Пещеры и карстовые озера Волго-Вятского края. Киров, 1992. 87 с.
7. Ступишин А.В. Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. Казань: Издательство Казанского университета, 1967. 292 с.
8. Тимофеева М.Ю., Ильин А. Лимнологические исследования озера Морской глаз. Студенческая наука и XXI век. 2009. № 6. С. 143–146.
9. Чикишев А.Г. Карст Русской равнины. М.: Наука, 1978. 190 с.
10. Bandini F., Jakobsen, J., Olesen D., Reyna-Gutierrez J.A., Bauer-Gottwein P. Measuring water level in rivers and lakes from lightweight Unmanned Aerial Vehicles. Journal of Hydrology. 2017. Vol. 548. P. 237–250. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.038.
11. Duan P., Wang M., Lei Ya., Li J. Research on Estimating Water Storage of Small Lake Based on Unmanned Aerial Vehicle 3D Model. Water resources. 2021. Vol. 48. No. 5 P. 690–700. DOI: 10.1134/S0097807821050109.
12. Yasinskii S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Narykov A.N. Anthropogenic Load and the Effect of Drainage Area on the Diffuse Runoff of Nutrients into a Large Water Body: Case Study of the Cheboksary Reservoir. Water Resources, 2020. Vol. 47. P. 810–827. DOI: 10.1134/S009780782005022X.

## REFERENCES

1. *Anokhin V.M., Dudakova D.S., Dudakov M.O.* Geomorphology and typing of the Lake Ladoga shores with the use of dron. *Geomorphology RAS*. 2019. No. 1. P. 25–37. DOI: 10.31857/S0435-42812019125-37 (in Russian).
  2. *Bandini F., Jakobsen, J., Olesen D., Reyna-Gutierrez J.A., Bauer-Gottwein P.* Measuring water level in rivers and lakes from lightweight Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Hydrology*. 2017. Vol. 548. P. 237–250. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.038.
  3. *Belov K.V., Ignatov P.A., Goryunov E.Y.* Regime of karst and glacial lakes at the carboniferous plateau of Tikhvin Ridge in the Northwest of the Russian platform. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Hidrogeologiya, Geokriologiya*. 2019. No. 2. P. 21–29. DOI: 10.31857/S0869-78092019221-29 (in Russian).
  4. *Chikishev A.G.* Karst of the Russian Plain. Moscow: Nauka, 1978. 190 p. (in Russian).
  5. *Duan P., Wang M., Lei Ya., Li J.* Research on Estimating Water Storage of Small Lake Based on Unmanned Aerial Vehicle 3D Model. *Water resources*. 2021. Vol. 48. No. 5 P. 690–700. DOI: 10.1134/S0097807821050109.
  6. *Russkikh A.V., Ivanov A.D.* Caves and karst lakes of the Volga-Vyatka region. Kirov, 1992. 87 p. (in Russian).
  7. *Stupishin A.V.* Plain karst and patterns of its development on the example of the Middle Volga region. Kazan: Kazan University, 1967. 292 p. (in Russian).
  8. *Timofeeva M.Yu., Ilyin A.* Limnological studies of Morskoy glaz Lake. Student science and XXI century. Student science in the 21st century. 2009. No. 6. P. 143–146 (in Russian).
  9. *Vasilyeva D.P.* Landscape Geography of the Mari ASSR. Yoshkar-Ola: Mari book publishing house, 1979. 136 p. (in Russian).
  10. *Yasinskii S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Narykov A.N.* Anthropogenic Load and the Effect of Drainage Area on the Diffuse Runoff of Nutrients into a Large Water Body: Case Study of the Cheboksary Reservoir. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. P. 810–827. DOI: 10.1134/S009780782005022X.
  11. *Zhuravlev A.I., Fadeev A.N.* Obtaining and processing of morphometric characteristics of Morskoy glaz Lake. Engineering personnel – the future of the innovative economy of Russia. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2015. Vol. 5. P. 215–217 (in Russian).
  12. *Zhuravlev A.I.* The creation of a DSM using the method of photographing the position of the point depth. *Modern scientific researches and innovations*. 2016. No. 7. Web resource: <https://web.snauka.ru/issues/2016/07/69267> (accessed 01.04.2022) (in Russian).
-