

УДК 556.512.001.572:551.508.826
DOI: 10.46698/VNC.2026.13.15.001

Оригинальная статья

Организация комплексного мониторинга заливов русловых водохранилищ Юга России с использованием данных дистанционного зондирования

И.Е. Курбатова^{1,2}, М.О. Мулин^{1,3}

¹ Институт водных проблем РАН, Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3;

² Московский государственный университет геодезии и картографии,
Россия, 105064, г. Москва, Гороховский пер., 4;

³ Государственный университет по землеустройству, Россия, 105064,
г. Москва, ул. Казакова, 15, e-mail: mulin_99@mail.ru

Статья поступила: 27.03.2026, доработана: 10.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Русловые водохранилища Юга России на всем протяжении своего существования подвергаются значительным изменениям за счет интенсивной переработки берегов, заиливания и зарастания. Выполнение своевременной оценки степени происходящих изменений в условиях масштабной антропогенной нагрузки региона, климатической нестабильности и дефицита регулярных наземных наблюдений является важной и актуальной задачей. К числу наиболее динамичных участков берегов водохранилищ относятся заливы, образовавшиеся в результате затопления русел и долин боковых притоков главной реки подпором созданного водохранилища. Трансформация таких заливов зависит от суммарного влияния гидрологических, физических, морфологических, биологических и других доминирующих факторов. **Цель работы** заключается в обосновании и разработке структуры комплексного мониторинга современного геоэкологического состояния крупных заливов за последнее десятилетие. **Методы исследования.** В основу разрабатываемых методов положена бассейновая концепция природопользования, которая признана наиболее важным и эффективным методом территориальной организации мониторинга. Применительно к заливам водохранилищ использование этой концепции позволяет выявить взаимосвязи и взаимозависимости частей единой геосистемы «водосбор–водоток–устье–залив–приемный водоем». Особое влияние на формирование экологического состояния заливов оказывают не только разновременные и разнонаправленные колебания уровня водохранилища, но и режим и качество речного стока, характер и интенсивность антропогенной нагрузки на водосбор. Разработка содержания информационных блоков мониторинга осуществлялась с применением дистанционных и картографических методов на основе ГИС-технологий. **Результаты.** Разработана структура блоков комплексного мониторинга заливов русловых водохранилищ и апробирована методика их информационного наполнения на примере заливов Цимлянского водохранилища. В данной статье приводятся результаты исследований, выполнявшихся для Новоцимлянского залива и водосборов впадающих в него рек Цимлы и Россосы за период 2015–2025 гг. на основе совместного использования спутниковой информации, картографических материалов, ГИС-технологий, данных Донского бассейнового водного управления (БВУ) и экспертных оценок. Основным источником информации являлись многолетние данные искусственных спутников Земли (ИСЗ) Sentinel-2A, Sentinel-2B, Landsat-8,9. С помощью расчетных спектральных индексов (водных и вегетационных) получены данные о многолетних изменениях площади зеркала воды залива и динамике его зарастания. По разновременным снимкам прослежено изменение границ зон переменного подпора залива при максимальных и минимальных годовых изменениях уровня водохранилища.

Ключевые слова: геосистема «водосбор–водоток–водоем», водохранилище, спутниковый мониторинг, колебания уровня, боковые притоки, антропогенная нагрузка, изменение климата, зоны переменного подпора, картографический метод, ГИС-технологии.

Благодарности: Работа выполнена в рамках темы № FMWZ–2025–0002 Государственного задания ИВП РАН.

Для цитирования: Курбатова И.Е., Мулин М.О. Организация комплексного мониторинга заливов русловых водохранилищ Юга России с использованием данных дистанционного зондирования. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.13.15.001

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2026.13.15.001

Original paper

Organization of comprehensive monitoring of embayments in channel reservoirs of Southern Russia using remote sensing data

I.E. Kurbatova^{1,2}, M.O. Mulin^{1,3}

¹ Water Problem Institute, Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina Str.,
Moscow 119333, Russian Federation;

² Moscow State University of Geodesy and Cartography, 4 Gorokhovskiy Lane,
Moscow 105064, Russian Federation;

³ State University of Land Use Planning, 15 Kazakova Str.,
Moscow 105064, Russian Federation, e-mail: mulin_99@mail.ru

Received: 27.03.2026, revised: 10.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. Channel-type reservoirs of Southern Russia have undergone substantial transformations throughout their existence as a result of intensive shoreline reworking, sedimentation, and overgrowth by aquatic and semi-aquatic vegetation. Timely assessment of the magnitude and direction of these changes under conditions of strong anthropogenic pressure, climatic instability, and a lack of regular in situ observations is a critical and highly relevant task. Among the most dynamic shoreline segments of reservoirs are bays formed by the inundation of channels and valleys of lateral tributaries of the main river due to backwater effects caused by reservoir impoundment. The transformation of such bays is governed by the combined influence of hydrological, physical, morphological, biological, and other dominant factors. **Objective.** The objective of this study is to substantiate and develop the structure of an integrated monitoring system for assessing the current geoecological condition of large reservoir bays over the past decade. **Methods.** The proposed methodology is based on the basin-oriented concept of nature management, which is recognized as one of the most effective approaches to the territorial organization of environmental monitoring. When applied to reservoir bays, this concept makes it possible to identify interconnections and interdependencies between components of the unified geosystem “catchment-main river-estuaries-reservoir”. The ecological condition of reservoir bays is strongly influenced not only by asynchronous and multidirectional water-level fluctuations of the reservoir, but also by the regime and quality of river runoff, as well as the nature and intensity of anthropogenic pressure within the catchment area. The development of the monitoring information blocks was carried out using remote sensing and cartographic methods based on GIS technologies. **Results.** A structured system of integrated monitoring blocks for bays of channel-type reservoirs was developed, and the methodology for their informational content was tested using the bays of the Tsimlyansk Reservoir as a case study. This paper presents the results of studies conducted for the Novotsimlyansky Bay and the catchments of the Tsimla and Rossosh rivers discharging into it over the

period 2015–2025. The analysis was based on the combined use of satellite imagery, cartographic materials, GIS technologies, data from the Don Basin Water Authority, and expert assessments. The primary data sources were long-term satellite observations from Sentinel-2A, Sentinel-2B, and Landsat-8/9. Calculated multispectral indices (water and vegetation indices) were used to quantify long-term changes in the bay's water surface area and the dynamics of its overgrowth. Multitemporal imagery enabled tracing changes in the boundaries of zones subject to variable backwater influence under conditions of maximum and minimum annual reservoir water-level fluctuations.

Keywords: geosystem “catchment-main river-reservoir”, reservoir, satellite monitoring, water level fluctuations, lateral inflows, anthropogenic load, climate change, variable backwater area, cartographic method, GIS technologies.

Acknowledgements: *This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no FMWZ–2025–0002.*

For citation: Kurbatova I.E., Mulin M.O. Organization of comprehensive monitoring of embayments in channel reservoirs of Southern Russia using remote sensing data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.13.15.001

Введение

На всем протяжении многолетнего существования русловых водохранилищ происходит переформирование береговой зоны, специфика которого определяется конкретными геологическими и геоморфологическими особенностями строения ложа и берегов искусственного водоема, внутригодовыми изменениями уровня воды за счет сработки/заполнения водохранилища и многолетними климатическими флуктуациями, определяющими многоводные и маловодные длительные периоды [Авакян, 2002; Водохранилища..., 1986; Вода России..., 2001; Шинкаренко и др., 2021]. Разные участки береговой зоны водохранилищ отличаются по степени пространственной и временной изменчивости в зависимости от доминирования того или иного фактора. Наиболее чувствительны к преобразованиям заливы, которые на протяжении десятилетий испытывают сильное влияние не только со стороны водоема, но и со стороны притока (в нижнем течении которого залив сформировался) и его водосбора.

Потребность в мониторинге береговой зоны водохранилища, включая заливы, определяется условиями водопользования, землепользования, рыбоводства, предотвращения опасных природных явлений (Правила использования водных ресурсов Цимлянского водохранилища. Федеральное Агентство водных ресурсов. 02 июня 2016. 125 с.) [Матишов, Дженюк, 2006; Скрипка и др., 2017]. В условиях дефицита стационарных и эпизодичности полевых наблюдений использование спутниковых данных высокого пространственного разрешения и их расчетных преобразований является источником актуальной информации для осуществления мониторинга переформирования заливов (как сезонных, так и межгодовых), и водоохраных зон для накопления, систематизации, анализа и картографирования полученной информации на базе ГИС-технологий [Губанов, 2022; Курбатова, Мулин, 2024].

Исследования проводились на примере Новоцимлянского залива Цимлянского водохранилища. Всего в водохранилище впадает 24 притока, суммарная площадь их водосборов составляет 46 тыс. км² – 16% от общей площади водосбора Дона (рис. 2а), а суммарный объем бокового стока может достигать 1,1 км³ (около 6% всех поступлений) [Гидрометеорологический..., 1977; Научно-прикладной..., 2020]. Новоцимлянский залив является самым большим по площади среди остальных заливов.

Цель данной работы – разработать структуру комплексного спутникового мониторинга заливов как главного звена единой геосистемы «водосбор – водоток – залив – приемный водоем», выявить зону переменного подпора при разных положениях уровня водохранилища и оценить межгодовые и сезонные изменения зарастания залива влаголюбивой растительностью за 2015–2025 гг.

Материалы и методы исследования

Разработка структурных направлений комплексного геоэкологического мониторинга базировалась на бассейновом подходе, при котором водохранилище рассматривается как составная часть единой геосистемы «водосбор – водоток – устье – залив – приемный водоем», а главным звеном системы являлся залив.

Многофакторные закономерности трансформации заливов требуют особого подхода к выявлению внешних и внутренних взаимозависимостей, связанных как с вкладом бокового стока в заиление и загрязнение вод залива, так и с переформированием подводной и надводной частей его берегов в результате волновой абразии, оползневых, эрозионных и других процессов в зоне изменений уровня воды. Такой подход в условиях многолетнего дефицита наземных наблюдений реализован на основе разработанных методических рекомендаций по совместному использованию космических снимков (КС), топографических карт и ГИС-технологий [Курбатова, Мулин, 2023, 2024].

Зона переменного подпора залива является наиболее чувствительной к воздействию изменений, происходящих как на водосборе, так и в водохранилище. Основные взаимосвязи геосистемы «водосбор – река – зона переменного подпора – приемный водоем» в диапазоне изменения от НПУ до уровня мертвого объема (УМО) представлены на рисунке 1.

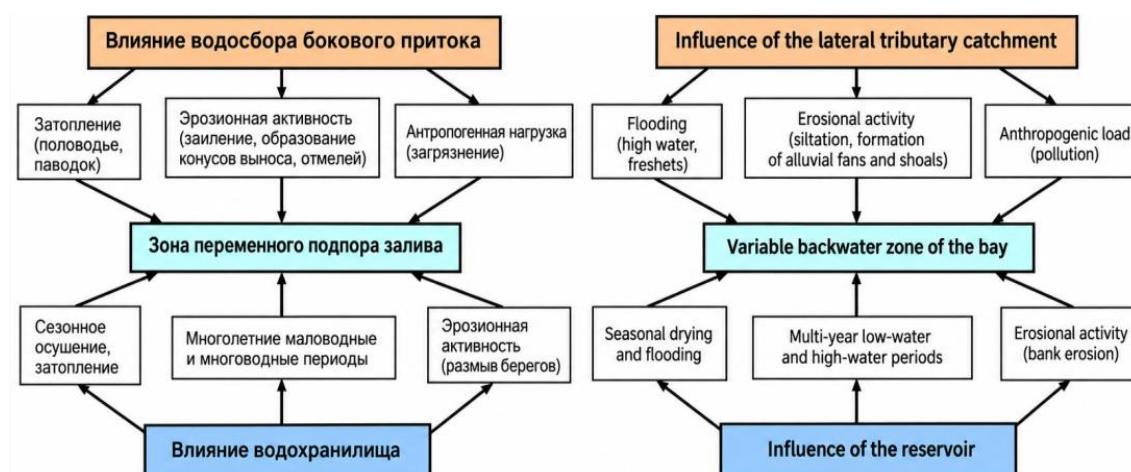


Рис. 1. Основные факторы, влияющие на трансформацию и экологическое состояние зоны переменного подпора заливов водохранилища /

Fig. 1. The main factors influencing the transformation and ecological state of the variable backwater zone of the reservoir bays

К экологически значимым факторам в зоне переменного подпора относятся разнонаправленные колебания уровня, длительность осушения/затопления, заиление или размыв мелководных участков, загрязнение (поступающее со стоком реки и водохранилища). Непредсказуемость продолжительности и интенсивности проявления этих факторов, зависящих от водности года, усиления антропогенной нагрузки на водосбор и/или водоем требует регулярных наблюдений для выявления негативных последствий.

Информационное обеспечение исследований включает:

- подбор спутниковой информации высокого разрешения за исследуемый период для: а) залива, включающий сезонные и межгодовые уровни наполнения/сработки водохранилища; б) устья притока на период половодья и межени в разные по водности годы;

- обеспечение дат спутниковой съемки данными Донского БВУ об уровне водохранилища;

– результаты преобразования мультиспектральных ДЗЗ с помощью следующих расчетных разностных индексов – модифицированного водного индекса MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) для определения динамики площади водной поверхности и вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для изучения состояния и распределения жизненных форм растительности.

Эти индексы давно зарекомендовали свою надежность при изучении зон периодического затопления/осушения при колебаниях уровня водных объектов и выявлении связи растительного покрова с частотой затопления [Baigaliyeva et al., 2024; Li et al., 2024; Tolepbayeva et al., 2025].

Разработанная авторами концепция структуры и содержания блоков мониторинга, исходная информация для решения базовых задач и визуализация результатов представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Разработка содержания блоков комплексного мониторинга зон переменного подпора крупных заливов водохранилищ /
Development of the content of integrated monitoring units for variable back-up zones of large reservoir bays**

Блоки / Object name (Blocks)	Задачи/ Tasks	Исходная информация/ Initial information	Расчетные данные/ Calculation Data	Визуализация результатов/ Visualization of results
1	2	3	4	5
Водосбор: Физико-гео- графические условия/ Catchment: Physical and geographic char- acteristic.	Выделение границ водосбора; Построение гидрографической сети (реки, пруды, озера); Оценка рельефа и состояния почвенно-растительного покрова/ Selection of catchment area boundary; Construction of a hydrographic network (rivers, ponds, lakes); Assessment of the relief and condition of the soil and vegetation cover.	Топографические, почвенные, ландшафтные карты; Данные ДЗЗ для обновления топографических карт; цифровая модель рельефа (ЦМР) и ее производные/ Topographic, soil, and landscape maps; Remote sensing data for updating topographic maps; digital elevation model (DEM) and its derivatives.	Площадь водосбора; длины главной реки и ее притоков; Распределение высот, углов наклона; Лесистость, озерность, заболоченность, овражность/ Catchment area boundary; length of the main river and its tributaries; distribution of elevations and slopes; forest cover, lake cover, swampiness, and gully coverage.	Карты водосбора: гидрографическая сеть, гипсометрическая, углов наклона поверхности, растительности, почвенная/ Catchment area maps: hydrographic network, hypsometric data, surface slopes, vegetation, and soil data.
Антропогенная нагрузка/ Anthropogenic load.	Выявление населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных объектов, транспортной сети/ Identification of settlements, industrial and agricultural facilities, and the transportation network.	Топографические карты, материалы визуального и автоматизированного дешифрирования КС, статистические и экспертные данные/ Topographic maps, materials on visual and automated interpretation of satellite images, statistical and expert data.	Оценка демографического давления, густоты транспортной сети (с зоной загрязнения), доля пашен (с водной эрозией, без нее и зарастающих) / Assessment of population pressure, transport network density, and the proportion of arable land (with and without water erosion, and overgrown).	Карты современного состояния водосбора с оценкой сельскохозяйственных земель по степени развития эрозионных процессов/ Current watershed maps with assessment of agricultural lands based on the degree of erosion.

1	2	3	4	5
Устья притоков/ Estuaries of tributaries.	Выявление степени затопления, заиления и зарастания устьев при высоких и низких паводках, наполнении или сработке водохранилища/ Determination of the degree of flooding, siltation, and plantgrowing of estuaries during high and low floods, filling or decrease of storage reservoir.	Комплект КС за исследуемый период половодий и межени; Экспертные данные о выносах твердых взвесей речным стоком с пашен/ A set of satellite images for the studied period of floods and low water. Expert data on the outwash of suspended solid materials by river runoff from arable land.	Оценка площадей пахотных земель по степени востребованности, развитию эрозионных процессов, выносов твердых взвесей и диффузных загрязнений по экспертным данным/ Estimation of arable land area by demand, development of erosion processes, removal of suspended solids, and diffuse pollution based on expert data.	Карты динамики дельтообразования при разных отметках уровня водохранилища; Расчет вероятного поступления твердых взвесей с водосбора в залив/ Maps of delta formation dynamics at different reservoir elevations; Calculation of the probable influx of suspended solids materials and diffuse pollutants from the catchment into the bay.
Залив/ Bay.	Установление зоны переменного подпора. Контроль и слежение за изменением положения уреза воды при различных стояниях уровня водоема / Determination of a variable backwater area. Monitoring and tracking changes in the waterline at different reservoir levels.	Архив КС за выбранный период. Данные постов наблюдения БВУ об уровне водохранилища на даты съемки/ Archive of satellite images for the selected period. Data from BWM observation posts on reservoir levels as of the survey dates.	Расчетные данные индексов – водного MNDVI, вегетационного NDVI, мутьевого выноса NDTI. Определение площадей зеркала воды, зарастания и заиления залива на разные даты/ Calculated indices – aquatic MNDVI, vegetation NDVI, and turbidity removal NDTI. Determination of the water surface area, overgrowth, and siltation of the bay on various dates.	Установление зон переменного подпора в устьях притоков и берегов залива; Оценка поступления диффузных загрязнений с водосбора; Прогнозная карта затопления/осушения залива/ Determination of a variable backwater area at the estuaries of tributaries; Distribution of suspended solid materials across the bay. Predictive flooding/drainage map.

Результаты

Новоцимлянский залив образован на правом берегу глубоководного приплотинного участка водохранилища в результате затопления нижнего течения рек Цимла и Россошь (рис. 2б), совместная площадь водосборов которых составляет 2730 км². Методика формирования блока мониторинга «водосбор» рассмотрена в статье [Kurbatova et al., 2024], где с помощью ДЗЗ дана оценка современной антропогенной нагрузки на водосбор и определены в первом приближении объемы поступлений в залив диффузных загрязнений и твердых взвесей с распаханых территорий, подверженных водной эрозии.

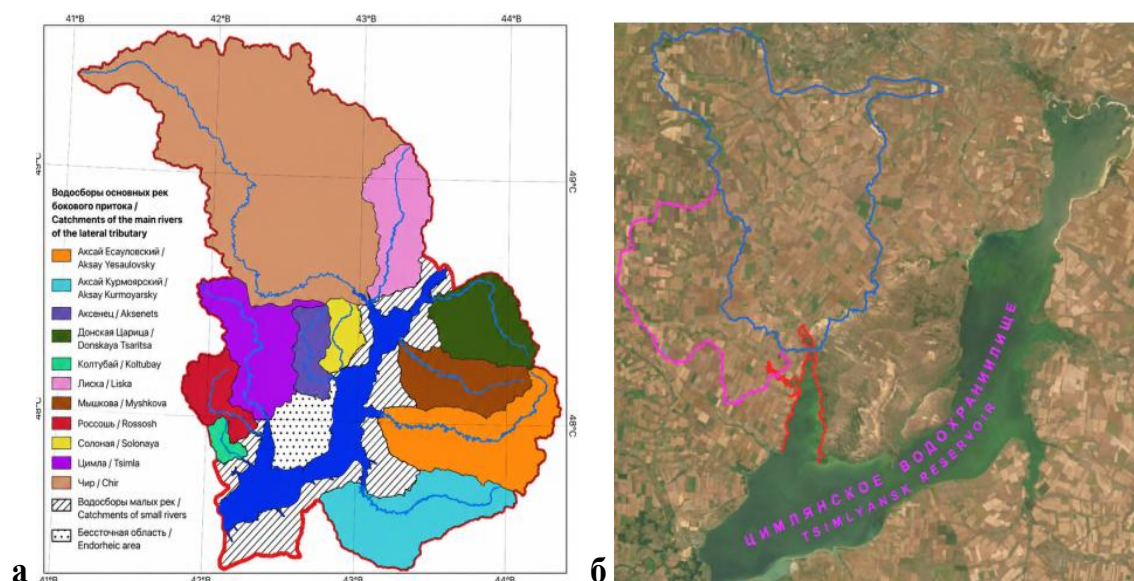


Рис. 2. Цимлянское водохранилище:

а – структура водосборов боковых притоков;

б – Новоцимлянский залив и водосборы рек Цимла и Россошь /

Fig. 2. Tsimlyansk reservoir:

a – is the structure of the catchments of the lateral tributaries;

b – is the Novotsimlyansk Bay and the catchments of the Tsimla and Rossosh rivers

Комплексный мониторинг залива проводился согласно разработанной авторами методике и охватывает период наблюдения с 2015 г. по 2025 г. Выбор этого временного диапазона обусловлен нестабильностью уровня водохранилища за счет чередования многоводных (2018, 2023, 2024 гг.) и маловодных (2015, 2020, 2021 гг.) периодов климатических флуктуаций. Выбор спутниковых изображений определялся отсутствием облачности, полнотой охвата территории и обеспеченностью данными Донского БВУ об уровне воды в водохранилище на дату съемки. Всего было выбрано 25 спектральных снимков с ИСЗ Landsat-8/9, Sentinel-2A, Sentinel-2B. Определение площади водной поверхности залива выполнялось с помощью расчетного индекса MNDWI в программе ArcGis Pro. Для построения таблиц и проведения интерполяции полученных данных использовалась программа Microsoft Excel. Индекс MNDWI считается наиболее точным при определении положения береговой линии водных объектов [Токарев, 2019; Tolerbayeva et al., 2025], поскольку обеспечивает наиболее корректное выделение водной поверхности за счет подавления спектрального вклада растительности и позволяет достаточно легко выделять границу воды и суши по снимкам в автоматическом режиме.

В статье приводятся примеры только основных этапов многолетних и сезонных колебаний уровня водохранилища в диапазоне от НПУ (36,0 м) до близкого к УМО (31,0 м). Диапазон колебаний уровня водохранилища находится в пределах 5 м, что дает возможность прогноза площади зеркала воды и осушаемых мелководий при различных колебаниях уровня между НПУ и УМО. В качестве примера приведены изображения индекса MNDWI для шести дат, отображающих минимальные, максимальные и промежуточные положения уровня воды за выбранный период (рис. 3).

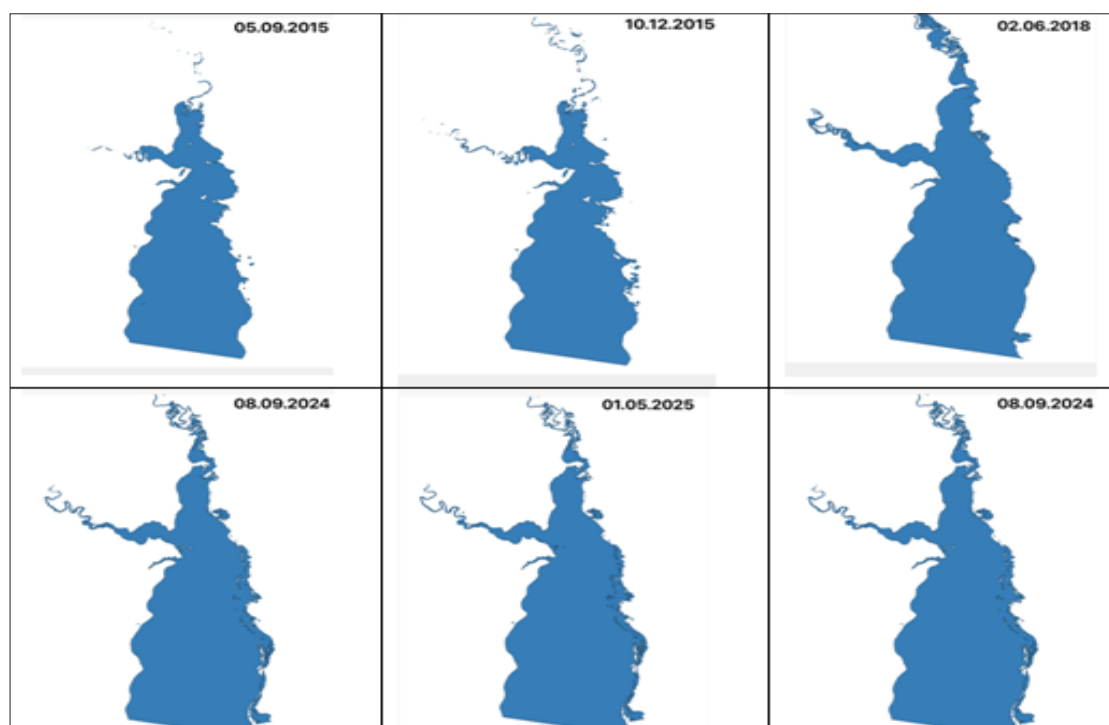


Рис. 3. Изменения площади водной поверхности залива за 2015–2025 гг. /
Fig. 3. Changes in the area of the bay's water surface 2015–2025

В таблице 2 приведены значения площади залива при разных положениях уровня. За эталон размера залива (100%) было принято его изображение на топографической карте масштаба 1:200000 (1999 г.), которое соответствует положению береговой линии при отметке уровня НПУ и составляет 132 км². Так, при низком уровне, близком к УМО, площадь водной поверхности сокращается до 66% от площади при НПУ, а при самом высоком уровне наполнения водохранилища в 2018 г. – составляет 91%. При промежуточных уровнях около 34 м абс. площадь акватории за счет глубоководности центральной и западной частей изменяется незначительно, в пределах 80–86%, что наглядно показывает сопоставление графиков колебания уровня и изменения площади водной поверхности залива (рис. 4).

Таблица 2 / Table 2

**Изменение площади водной поверхности залива при максимальном, минимальном и промежуточных положениях уровня водохранилища /
Changes in the area of the water surface of the bay at maximum, minimum and intermediate positions of the reservoir level**

Дата снимка/ satellite image date	05.09.2015	10.12.2015	02.06.2018	08.09.2024	01.05.2025	08.09.2025
Уровень воды, м / Water level, m	31,50	31,34	35,91	34,10	34,06	32,97
Расчеты по MNDWI / Calculations by MNDWI						
Площадь воды, км ² / Water area, km ²	86,0	87,5	120,7	113,7	86,0	87,5
Площадь воды, %/ Water area, %	65,2	66,3	91,4	86,1	86,0	79,8
Площадь осушки, %/ Land area, %	34,8	33,7	8,6	13,9	14,0	20,2

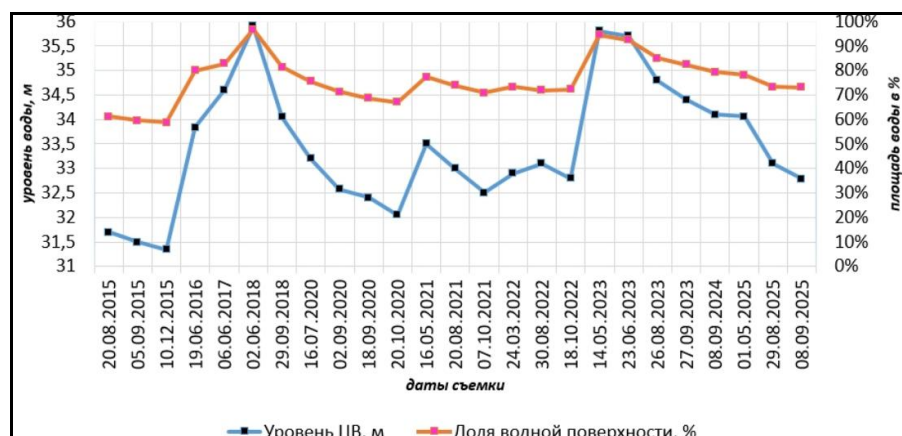


Рис. 4. Соотношение доли водной поверхности залива (в %) с уровнем Цимлянского водохранилища (м) /

Fig. 4. The ratio of the share of the water surface of the bay (%) with the level of the Tsimlyansk reservoir (m)

Наиболее подвержен изменениям мелководный восточный абразионно-аккумулятивный берег залива и его вершинный аккумулятивный участок в местах впадения рек Цимла и Россось. Вдоль приглубого западного абразионно-обвального берега перемещения границы «вода–суша» при колебаниях уровня водохранилища незначительны (рис. 5а, б).

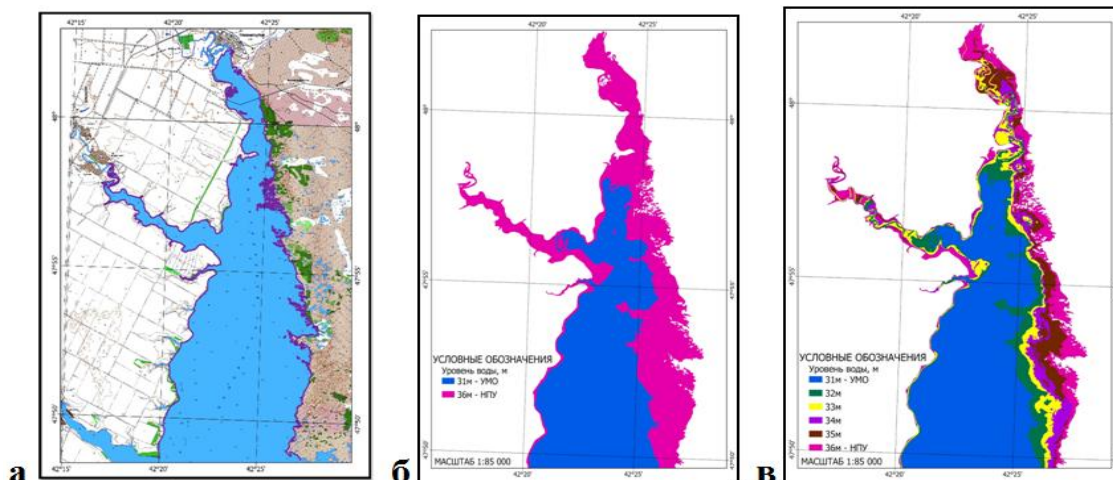


Рис. 5. Картографическая оценка изменения водной поверхности залива при разных положениях уровня водохранилища: а – при НПУ; б – при УМО (синим цветом);

в – прогнозная карта зоны затопления/осушения при изменении уровня через 1 м в диапазоне 31,0–36,0 м (зеленым 31,0–32,0; желтым 32,0–33,0; сиреневым 33,0–34,0; коричневым 34,0–35,0; фиолетовым 35,0–36,0) /

Fig. 5. Cartographic assessment of changes in the water surface of the bay at different reservoir levels: a – at RDSL; b – at RWLL (blue); c – forecast map of flooding/drying zones with water-level changes at 1 m intervals within the range of 31.0–36.0 m (green 31.0–32.0; yellow 32.0–33.0; lilac 33.0–34.0; brown 34.0–35.0; purple 35.0–36.0)

На завершающем этапе этого блока мониторинга построена картографическая модель динамики площади зеркала воды залива при изменении уровня водохранилища на 1 м для прогноза затопления или осушения береговой зоны (рис. 5в). Установлено, что при изменении уровня воды на 0,1 м площадь водного зеркала увеличивается на 1%. По данным «Справочника основных гидрологических характеристик водных объектов

бассейна реки Дон» [Научно-прикладной..., 2020] такая же зависимость наблюдается в среднем для всего Цимлянского водохранилища. Интерполяция полученных данных на конкретные даты съемки позволила определить изменения площади водного зеркала при всех возможных вариантах значений уровня воды от 31,0 м (УМО) до 36,0 м (НПУ) с шагом 1 м (рис. 5в). К примеру, при УМО доля площади водной поверхности от НПУ составляет 56,9%, то есть при обмелении залива с 36,0 м до 31,0 м площадь водного зеркала сокращается на 43,1%. При промежуточной отметке в 33,0 м площадь зеркала воды сократится на 25,6%.

Изменение уровня воды относится к экологически значимым факторам. В первую очередь осушение или затопление мелководий влияет на степень зарастания залива, состояние нерестилищ и изменение кормовой базы рыб. Однако получение натурной информации о пространственном зарастании залива является трудоемким и времязатратным процессом. Современные спутниковые снимки позволяют дистанционно осуществлять мониторинг акваторий на качественно ином уровне, дополняя и частично заменяя непосредственные полевые исследования [Кутявина и др., 2024; Кочеткова, 2019, 2018; Погорелов и др., 2017; Li et al., 2024]. Участки зарастания, особенно куртины тростника, хорошо опознаются при визуальном дешифрировании снимков в видимом диапазоне, но использование вегетационного индекса NDVI, отражающего количество фотосинтетически активной биомассы на исследуемой территории, является более эффективным и надежным способом. Для определения состояния растительного покрова сравнивают значения поглощения и отражения красных и инфракрасных лучей. NDVI помогает отличить погруженную водную растительность от чистой воды (<1). Для водной растительности значения обычно положительны (0,2–0,5), причем чем выше значение индекса, тем больше зеленой фитомассы на участке (рис. 6).

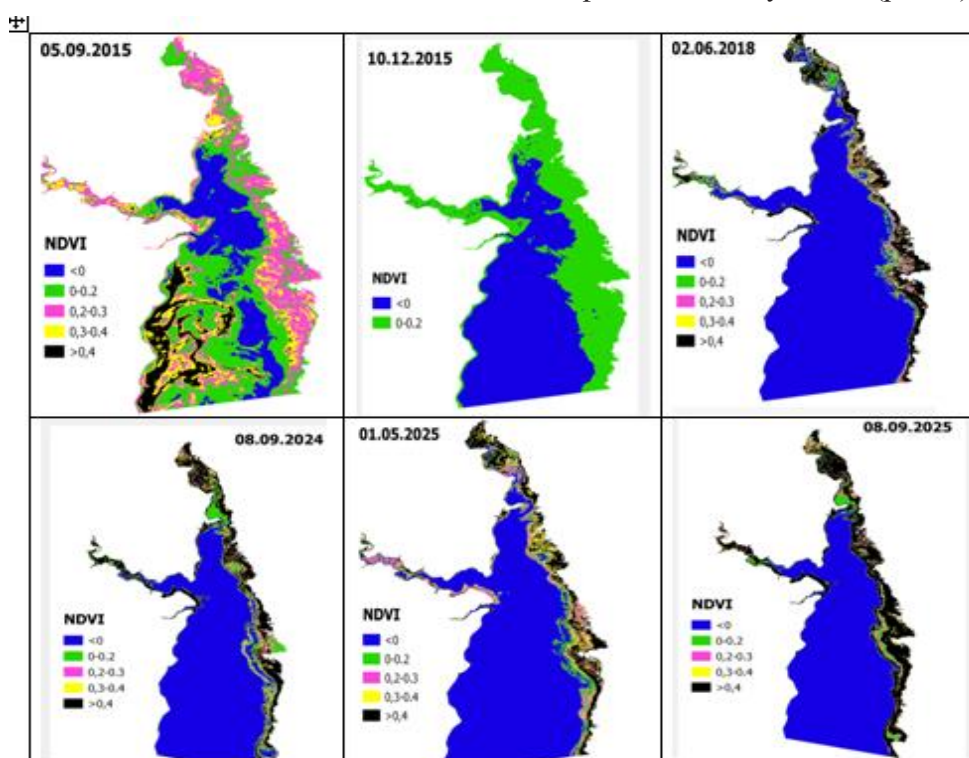


Рис. 6. Пространственно-временная изменчивость зарастания Новоцимлянского залива за 2015–2025 гг. (<0 – чистая водная поверхность; 0–0,2 – водоросли, ряска; 0,2–0,3 – разреженная ВВР; 0,3–0,4 – сплошная ВВР; $>0,4$ – околотовдная растительность) /
Fig.6. Spatiotemporal variability of overgrowth of the Novotsimlyansky Bay 2015–2025. (<0 – clean water surface; 0–0.2 – algae, duckweed; 0.2–0.3 – sparse water surface; 0.3–0.4 – continuous water surface; >0.4 – semi-aquatic vegetation)

Анализ разновременных снимков показал, что зарастание мелководий залива ВВР происходит при постепенном понижении уровня на протяжении двух или нескольких лет (маловодный период). При наступлении многоводного периода и увеличении глубин при постоянном повышении уровня наблюдается отмирание высшей водной растительности (ВВР) в зависимости от длительности и величины затопления. Полученные данные позволяют прогнозировать те или иные изменения зарастания залива для различных по водности периодов. Совместный анализ результатов визуального дешифрирования снимков с сервиса Google Earth Pro и изображений вегетационного индекса NDVI позволил выделить ареалы распространения погруженной, околотовной растительности, сплошных и разреженных куртин ВВР. Наибольшее зарастание отмечается в верхней части залива и вдоль его восточного берега, особенно в конце лета и осенью. Ситуация декабря 2015 г. отображает зафиксированную индексом NDVI единую область распространения растительности в период прекращения вегетации.

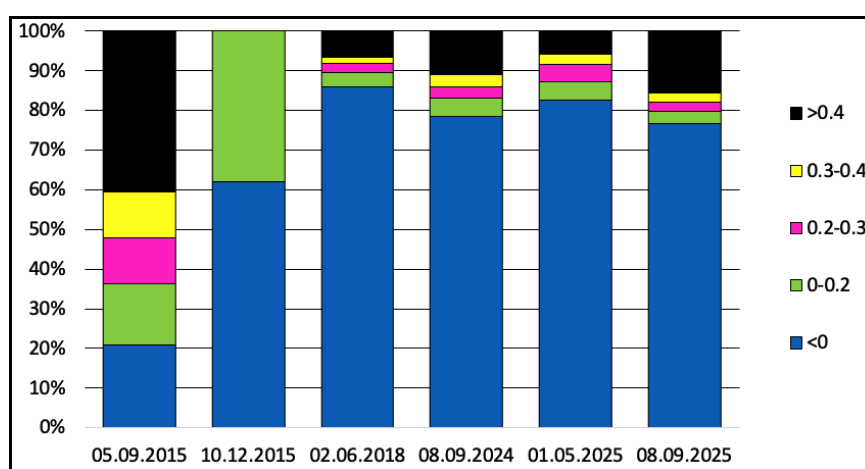


Рис. 7. Площадь и структура зарастания залива в 2015–2025 гг. /

Fig. 7. Area and structure of overgrowing of the bay 2015–2025

На рисунке 7 представлена диаграмма распределения площадей и структуры водной растительности для разных лет и сезонов. Самая большая площадь зарастания залива (80%) отмечалась в сентябре 2015 г. при уровне выше УМО лишь на 0,5 м, самая незначительная (14%) – в полноводном 2018 г. Сезонная тенденция к увеличению площадей зарастания прослеживается ежегодно, но их доля будет зависеть от климатических флуктуаций и характера водных периодов.

Выводы

– Разработанный методический подход к структурированию блоков спутникового мониторинга на основе бассейновой концепции позволяет систематизировать базовые задачи, информационное обеспечение, его обработку и визуализацию результатов. Такой подход может быть использован для любой геосистемы «водосбор – водоток – устье – залив – приемный водоем»;

– Использование спектрально-аналитических спутниковых данных и расчетных индексов MNDWI и NDVI в условиях дефицита наземных наблюдений и труднодоступности местности является ценным источником информации для изучения динамики водного зеркала залива и условий его зарастания;

– Выполнена оценка изменения площади водной поверхности залива для уровней воды на даты спутниковой съемки. За исследуемый период площадь залива менялась от 65 до 91% от площади при НПУ. Такое изменение объясняется глубинами залива 8–10 м в средней и западной его частях;

– Разработана прогнозная карта зон затопления/осушения залива, на которой показаны границы его водной поверхности при разнонаправленном изменении уровня на 1 м в диапазоне 31,0–36,0 м (УМО-НПУ);

– Получены количественные и качественные оценки зарастания берегов и устьев притоков залива водной и околоводной растительностью в зависимости от сезона и водности года.

Подобные исследования для Новоцимлянского залива проводились впервые. Разработанная методика спутникового мониторинга может быть использована для изучения многолетней трансформации аналогичных заливов других русловых водохранилищ.

Литература

1. Авакян А.Б. Многоликие водохранилища – феномен XX века. Актуальные проблемы водохранилищ. – Ярославль: ИБВВ РАН, 2002. – С. 3–6.
2. Вода России. Водоохранилища / под ред. А.М. Черняева. – ФГУП РосНИИВХ. – Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2001. – 700 с.
3. Водоохранилища и их воздействие на окружающую среду. – М.: Наука, 1986. – 368 с.
4. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Манычские водохранилища / под ред. В.А. Знаменского, В.М. Гейтенко. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. – 204 с.
5. Губанов Р.С. Оценка состояния водоохранных зон Центрального Предкавказья, на примере водных объектов Красногвардейского муниципального округа Ставропольского края при помощи методов дистанционного зондирования Земли // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 3. – С. 157–169. DOI: 10.46698/VNC. 2022.95.62.011.
6. Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С., Баранова М.С., Фотина О.С. Михайлова Е.А., Курыкин А.А., Строганов А.В. Тенденции зарастания крупных заливов на месте устьевых областей рек Цимлянского водохранилища за период 1987–2019 гг. // Вестник Института. – 2019. – № 1(38). – С. 149–151. DOI: 10.24411/2071-7830-2019-10042.
7. Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С., Калужная И.Ю., Сиротина С.Л., Самотеева В.В., Ракшенко Е.П. Динамика зарастания Цимлянского водохранилища // Принципы экологии. – 2018. – № 1. – С. 60–72. DOI: 10.15393/j1.art.2018.7202.
8. Курбатова И.Е., Мулин М.О. Оценка геоэкологического состояния водосборов боковых притоков Цимлянского водохранилища (на примере р. Россосшь) // Труды IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов». Т. 1. – Пермь: ПГУ, 2023. – С. 265–269.
9. Курбатова И.Е., Мулин М.О. Опыт разработки картографической оценки влияния водосборов на русловые водохранилища юга России с использованием ГИС-технологий // Материалы 9-ой Междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в геологии, геофизике и географии–2024». – М.: Перо, 2024. – С. 74–76.
10. Кутявина Т.И., Рутман В.В. Ашихмина Т.Я. Оценка динамики зарастания высшими водными растениями акватории эвтрофного водохранилища с использованием спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21. № 1. – С. 299–307. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-299–307.
11. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л. Концепция экосистемного мониторинга аридных зон юга России // Современные проблемы аридных и семиаридных экосистем юга России: сборник научных статей / отв. ред. Г.Г. Матишов. – Ростов-н/Д: ЮНЦ РАН, 2006. – С. 17–34.
12. Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон. – СПб.: Свое издательство, 2020. – 262 с.
13. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Курносова А.С. Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Географический вестник. – 2017. – № 1(40). – С. 130–137.
14. Скрипка Г.И., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А. Современные береговые процессы Цимлянского водохранилища // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – 2017. – Т. 1. № 2. – С. 308–311.
15. Токарев А.В. Спектральные индексы растительности и воды // Современные проблемы ДЗЗ. – 2019. – Т. 16. № 2. – С. 45–56.

16. Шинкаренко С.С., Солодовников Д.А., Барталев С.А. Гидрологическая ситуация на водохранилищах юга европейской части России в 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. № 1. – С. 248–254. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254.
17. Baigaliyeva M., Atakhanova Z., Kairat A. Spatiotemporal variations in urban wetlands in Kazakhstan: a case of the Taldykol lake system in Astana city // Sustainability. – 2024. – Vol. 16(16). – Art. No. 7077. DOI: 10.3390/su16167077.
18. Kurbatova I.E., Mulin M.O., Shirokova V.A. Assessment of diffuse runoff formation using geoinformation technologies // Water Resources. – 2024. – Vol. 51. (Suppl 2). – pp. S262–S272. DOI: 10.1134/S0097807824605053.
19. Li S., Cheng L., Chang L., Fu C., Guo Z., Liu P. Multi-factor weighted image fusion method for high spatiotemporal tracking of reservoir drawdown area and its vegetation dynamics // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2024. – Vol. 129. – Art. No. 103855. DOI: 10.1016/j.jag.2024.103855.
20. Tolepbayeva A., Abiyeva D., Karagulova R., Tanbayeva A., Sharapkhanova Z. Identification of small lakes in Kazakhstan using remote sensing data // Journal of the Geographical Institute “Jovan Cvijic” SASA. – 2025. – Vol. 75. No. 2. – DOI: 10.2298/IJGI241025005T.

References

1. Avakyan A.B. The many-faced reservoirs – a phenomenon of the 20th century. Actual problems of reservoirs. Yaroslavl. IBVV RAS. 2002. pp. 3–6. (In Russ.)
2. Water of Russia. Reservoirs. Ed. by A.M. Chernyaev. RRIWR. Yekaterinburg. AQUA-PRESS. 2001. 700 p. (In Russ.)
3. Reservoirs and their impact on the environment. Moscow. Nauka. 1986. 368 p. (In Russ.)
4. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Tsimlyansk, watershed and Manych reservoirs. Eds. V.A. Znamensky, V.M. Geitenko. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1977. 204 p. (In Russ.)
5. Gubanov R.S. Assessment of the state of water protection zones of the Central Caucasus, on the example of water bodies of the Krasnogvardeysky Municipal District of the Stavropol Territory using remote sensing methods of the Earth. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 157–169. DOI: 10.46698/VNC.2022.95.62.011. (In Russ.)
6. Kochetkova A.I., Bryzgalina E.S., Baranova M.S., Fotina O.S., Mikhailova E.A., Kurykin A.A., Stroganov A.V. Trends in overgrowth of large bays formed at the river-mouth areas of the Tsimlyansk Reservoir during 1987–2019. *Bulletin of the Institute*. 2019. No. 1(38). pp. 149–151. DOI: 10.24411/2071-7830-2019-10042. (In Russ.)
7. Kochetkova A.I., Bryzgalina E.S., Kalyuzhnaya I.Yu., Sirotina S.L., Samoteeva V.V., Rakshenko E.P. Dynamics of overgrowth of the Tsimlyansk Reservoir. *Principles of Ecology*. 2018. No. 1. pp. 60–72. DOI: 10.15393/j1.art.2018.7202. (In Russ.)
8. Kurbatova I.E., Mulin M.O. Assessment of the geoecological state of the catchments of lateral tributaries of the Tsimlyansk Reservoir (on the example of the Rossosh River). In: *Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation “Modern Problems of Reservoirs and Their Catchments”*. Vol. 1. Perm. PGU. 2023. pp. 265–269. (In Russ.)
9. Kurbatova I.E., Mulin M.O. Experience in developing a cartographic assessment of the impact of catchments on channel reservoirs in Southern Russia using GIS technologies. In: *Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference “Innovations in Geology, Geophysics and Geography–2024”*. Moscow. Pero. 2024. pp. 74–76. (In Russ.)
10. Kutyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Assessment of the dynamics of overgrowth by higher aquatic vegetation in the water area of a eutrophic reservoir using satellite images. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2024. Vol. 21. No. 1. pp. 299–307. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-299-307. (In Russ.)
11. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L. The concept of ecosystem monitoring of arid zones in Southern Russia. In: *Modern Problems of Arid and Semi-Arid Ecosystems of Southern Russia: Collection of Scientific Articles*. Ed. by G.G. Matishov. Rostov-on-Don. Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2006. pp. 17–34. (In Russ.)
12. Scientific and applied reference book: Basic hydrological characteristics of water bodies in the Don River basin. Saint Petersburg. Svoe Izdatelstvo. 2020. 262 p. (In Russ.)

13. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kurnosova A.S. Satellite monitoring of the Krasnodar Reservoir. *Geographical Bulletin*. 2017. No. 1(40). pp. 130–137. (In Russ.)
14. Skripka G.I., Ivlieva O.V., Bepalova L.A. Modern coastal processes of the Tsimlyansk Reservoir. *Ecology. Economy. Informatics. Series: System Analysis and Modeling of Economic and Ecological Systems*. 2017. Vol. 1. No. 2. pp. 308–311. (In Russ.)
15. Tokarev A.V. Spectral indices of vegetation and water. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2019. Vol. 16. No. 2. pp. 45–56. (In Russ.)
16. Shinkarenko S.S., Solodovnikov D.A., Bartalev S.A. Hydrological situation at reservoirs in the south of the European part of Russia in 2020. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2021. Vol. 18. No. 1. pp. 248–254. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254. (In Russ.)
17. Baigaliyeva M., Atakhanova Z., Kairat A. Spatiotemporal variations in urban wetlands in Kazakhstan: a case of the Taldykol lake system in Astana city. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(16). Art. No. 7077. DOI: 10.3390/su16167077.
18. Kurbatova I.E., Mulin M.O., Shirokova V.A. Assessment of diffuse runoff formation using geoinformation technologies. *Water Resources*. 2024. Vol. 51. Suppl. 2. pp. S262–S272. DOI: 10.1134/S0097807824605053.
19. Li S., Cheng L., Chang L., Fu C., Guo Z., Liu P. Multi-factor weighted image fusion method for high spatiotemporal tracking of reservoir drawdown area and its vegetation dynamics. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024. Vol. 129. Art. No. 103855. DOI: 10.1016/j.jag.2024.103855.
20. Tolepbayeva A., Abiyeva D., Karagulova R., Tanbayeva A., Sharapkhanova Z. Identification of Small Lakes in Kazakhstan Using Remote Sensing Data. *Journal of the Geographical Institute “Jovan Cvijic” SASA*. 2025. Vol. 75. No. 2. DOI: 10.2298/IJGI241025005T.