

Новые методы и подходы в геоинформационном моделировании, анализе данных, разработке карт и атласов

New methods and approaches in geoinformation modeling, data analysis, creation of maps and atlases

УДК: 556.555.6

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-465-481

А.В. Погорелов¹, А.А. Лагута², П.Б. Нетребин³

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОННОГО РЕЛЬЕФА КРУПНОГО ДОЛИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЭВОЛЮЦИИ

АННОТАЦИЯ

До сих пор исследованию морфологии дна крупных водохранилищ, подвергающихся постепенному заилению, уделялось мало внимания. Морфометрические описания водохранилищ обычно ограничиваются видом, формой, высотным положением, размерами ложа и объемом воды в них. В статье представлены результаты анализа донного рельефа Краснодарского водохранилища и преобразований этого рельефа за 2005–2021 гг. Анализ выполнен по материалам батиметрических съемок для регулируемого объема водохранилища на площади 224 км² с построением соответствующих цифровых моделей рельефа. Рельеф дна водохранилища представлен плоскими участками затопленной аккумулятивной равнины с преобладающими уклонами около 0,2–0,4°, расчлененной речными руслами притоков низшего порядка. Преобразование рельефа вызвано постепенным заилением. Суммарный объем отложений для указанной площади в 2005–2021 гг. составил 127 млн м³ при среднем слое заиления 0,4 м. Для описания морфологических свойств рельефа дна нами использованы приемы геоморфометрии с расчетом индекса ВРІ (Bathymetric Position Index) и классификацией мезомасштабных форм рельефа на его основе. Для ложа установлены формы рельефа, относящиеся к трем видам поверхностей: плоские (плато), вогнутые (ложбины, впадины) и выпуклые (валы, тыловые склоны, фронтальные склоны). Построенные карты отражают дифференцированную морфологию поверхности ложа, эволюцию форм рельефа в условиях непрерывной трансформации котловины, а также позволяют судить о преобладающих процессах морфогенеза. Наиболее сложно в морфологическом плане построена береговая зона и мелководная часть

¹ Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040, e-mail: pogorelov_av@bk.ru

² Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040, e-mail: alaguta@icloud.com

³ Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040, e-mail: netrebinpetr@gmail.com

ложа. Здесь наряду с вдольбереговыми валами разного генезиса на аккумулятивной отмели могут формироваться ложбины и впадины в виде подводных русел на дельтах выдвигения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водохранилище, рельеф дна, морфометрический анализ, формы рельефа, трансформация

Anatoly V. Pogorelov¹, Andrey A. Laguta², Petr B. Netrebin³

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE BOTTOM TOPOGRAPHY OF A LARGE VALLEY RESERVOIR DURING ITS EVOLUTION

ABSTRACT

Until now, the study of the morphology of the bottom of large reservoirs, subject to gradual siltation, received little attention. Morphometric descriptions of reservoirs are limited by the type, shape, altitude position, size of the bed, and the volume of water in them. The article presents the results of the analysis of the bottom relief of the Krasnodar Reservoir and the transformations of this relief for 2005–2021. The analysis was performed based on the materials of bathymetric surveys for the regulated volume of the reservoir on an area of 224 km² with the construction of the corresponding digital relief models. The relief of the bottom of the reservoir is represented by flat areas of a flooded accumulative plain with prevailing slopes of about 0.2–0.4°, dissected by river channels of lower order tributaries. The transformation of the relief is caused by gradual siltation. The total volume of deposits for the specified area in 2005–2021 amounted to 127 million m³ with an average silt layer of 0.4 m. To describe the morphological properties of the bottom topography, we used geomorphometric techniques with the calculation of the BPI (Bathymetric Position Index) and the classification of mesoscale landforms based on it. For the bed, relief forms have been established related to three types of surfaces: flat (lower bank shelf), concave (depressions, deep depressions) and convex (reef crests, back reefs, mid-slope reefs). The constructed maps reflect the differentiated morphology of the bed surface, the evolution of landforms under conditions of continuous transformation of the basin, and also make it possible to judge the prevailing processes of morphogenesis. The coastal zone and the shallow part of the bed are the most complex in morphological terms. Here, along with reefs of different genesis, deep depressions and depressions in the form of underwater channels in advanced deltas can form on the accumulative shoal.

KEYWORDS: reservoir, bottom topography, morphometric analysis, landforms, transformation

ВВЕДЕНИЕ

Краснодарское водохранилище на р. Кубани (Россия) введено в эксплуатацию в 1973 г., и по классификации [Авакян и др., 1987] является крупным водохранилищем. Водоохранилище, расположенное на юге России вблизи г. Краснодара на границе двух регионов — Краснодарского края и Республики Адыгеи, имеет две ключевые функции — противопаводковую и ирригационную. При наполнении до проектного уровня в 1975 г. площадь водоема достигла 400 км², а полный объем — около 3 км³. Водоохранилище относится к долинному типу, имеет удлиненную форму. На начальной стадии эксплуатации оно имело длину 46 км, максимальную ширину 11 км при средней глубине 5,9 м и максимальной глубине 24,7 м [Лурье и др., 2005].

¹ Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: pogorelov_av@bk.ru

² Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: alaguta@icloud.com

³ Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia,
e-mail: netrebinpetr@gmail.com

Водохранилище служит опорным объектом всей ирригационной системы Краснодарского края и основным источником воды для посевов риса в нижнем течении р. Кубани с ежегодным забором воды на орошение около $3,3 \text{ км}^3$. В этом смысле важной характеристикой является полезный объем водохранилища — $2,2 \text{ км}^3$ согласно проектным показателям. Особенность водного режима — сезонное регулирование объема с относительно большими внутригодовыми амплитудами уровня воды, достигающими в отдельные годы 7 м. Такая амплитуда выступает фактором формирования поверхности ложа, способствует образованию значительных площадей переменного затопления, постоянному перемещению контактной зоны «вода – суша», а также влияет на циркуляцию водных масс.

Среди рек России, на которых созданы крупные водохранилища, р. Кубани свойственна наибольшая мутность — $0,68 \text{ кг/м}^3$. По данным¹ [Алексеевский и др., 2012] в водохранилище осаждается до 95–98 % наносов, приносимых рекой. По нашим расчетам, в течение 1973–2021 гг. в результате заиления полезный объем водохранилища сократился с 2160 до 1270 млн м^3 , а площадь зеркала — с 400 до 224 км^2 [Погорелов и др., 2022]. Заиление сопровождается непрерывной перестройкой подводного рельефа вследствие взаимосвязанных геоморфологических и гидрологических процессов — отложения наносов, изменения локальной структуры течений и пр.

В формировании рельефа ложа водохранилища и его трансформации ведущая роль принадлежит флювиальным процессам, из которых наиболее активно проявляют себя процессы дельтообразования. За период существования водохранилища эволюция речных дельт Кубани и Белой существенно повлияла на его морфометрические характеристики [Лагута, Погорелов, 2019; Pogorelov et al., 2021]. Сразу после наполнения Краснодарского вдхр. началось отчуждение его северо-восточной части — бывшего Тщикского вдхр. [Курбатова, 2014], чему способствовали развитие дельты р. Белой, сохранение старой плотины и обвалование Тщикского вдхр. При определенных отметках лежащий выше участок бывшего Тщикского вдхр. не становился русловым, что обычно свойственно долинным водохранилищам. В настоящее время отчужденному Тщикскому водоему присущи собственные условия циркуляции и отложения наносов.

По нашим расчетам за период 2005–2021 гг. (рис. 1) объем аккумуляции наносов в основном водоеме без учета отчленившегося Тщикского водоема и дельтовых отложений разделяющей перемычки составил 127 млн м^3 [Погорелов и др., 2022]. Максимальные объемы отложений и скорости осадконакопления в процессе выноса взвесей зафиксированы в дельтах Кубани и Белой, наименьшие — в области мертвого объема, т. е. в западной (наиболее глубокой) части котловины. Как видно на рис. 1, в наибольшей степени подвержен преобразованиям подводный рельеф вблизи берега, где в процессе активного вдольберегового и поперечного транспорта наносов происходит непрерывное формирование и преобразование аккумулятивных и абразионных форм. Активность рельефообразования в долинных водохранилищах в зоне вдольберегового переноса с формированием мезомасштабных форм подтверждается [Финаров, 1986; Назаров и др., 2011; 2013]. Наличие локальных отрицательных форм рельефа (ям) — результат ограниченного техногенного изъятия донных отложений в 2005–2021 гг.

Стандартные морфометрические характеристики водохранилищ, принятые в гидрометрии, отражают вид, форму, высотное положение, размеры ложа водоемов и объемы воды в них. Однако изучению морфологии дна, несмотря на ее роль в формировании интегральных морфометрических показателей, уделяется мало внимания. Причина — сложность получения исходных данных. Вместе с тем, геоморфологические особенности рельефа дна водохранилища, а также динамика рельефа являются ключевыми

¹ Правила использования водных ресурсов Краснодарского водохранилища. Кубаньводпроект. Краснодар: 2008. 158 с.

для понимания процессов трансформации водохранилища и прогнозирования его морфометрических характеристик (площадь, глубина, объем воды при разных уровнях, батиграфическая и объемная кривые водоема и др.). С развитием инструментов пространственного анализа с использованием ЦМР [Землянов и др., 2011; Калинин и др., 2018], в т. ч. инструментов геоморфометрии [Geomorphometry..., 2009; Флоринский, 2021], анализ рельефа дна водоемов вышел на новый технический уровень.

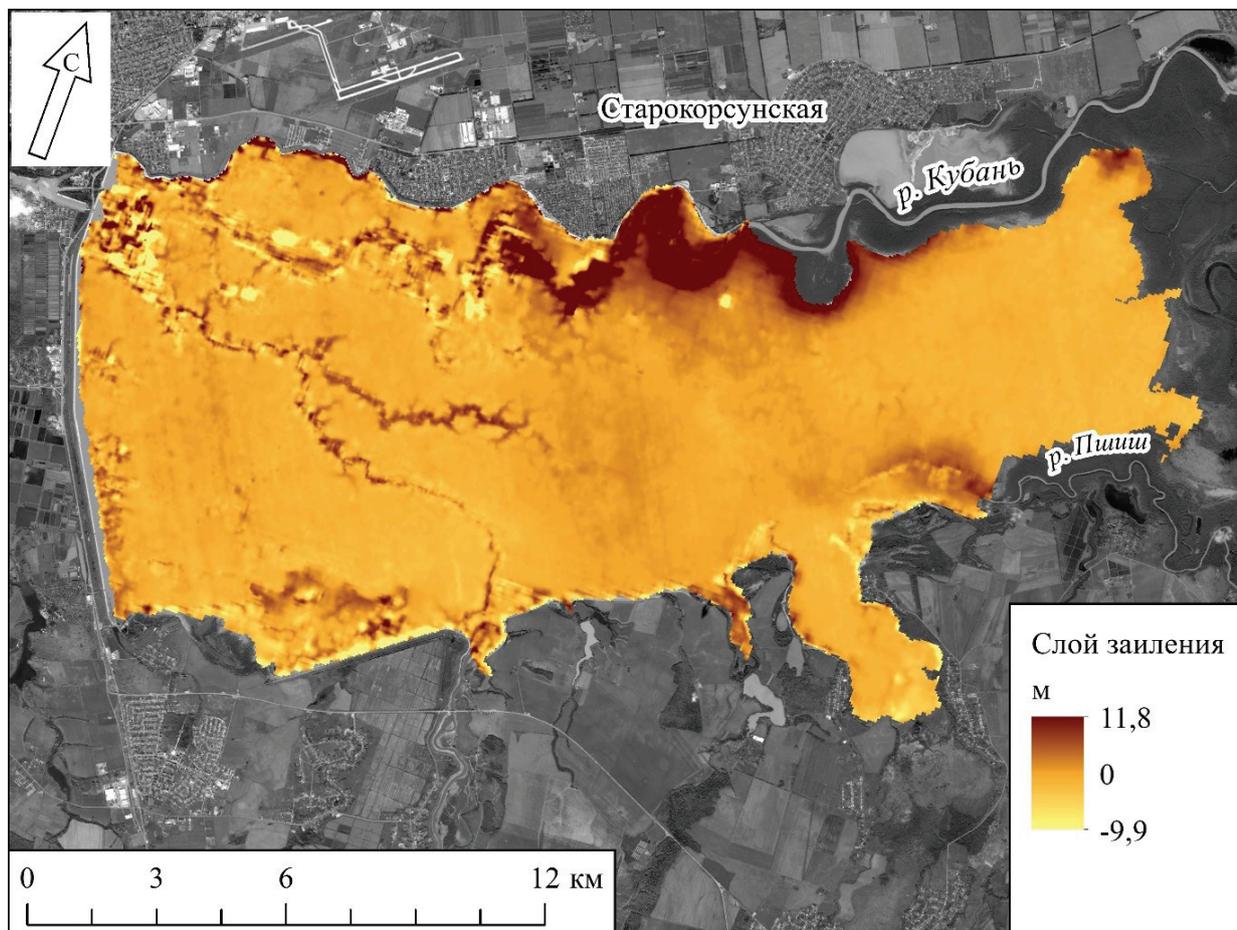


Рис. 1. Толщина слоя заиления Краснодарского водохранилища за период 2005–2021 гг.
Fig. 1. Increment of the siltation layer of the Krasnodar Reservoir over the period 2005–2021

Морфологические свойства рельефа дна Краснодарского водохранилища не изучены и представляют особый интерес с позиции его многолетних эволюционных преобразований. В статье решаются основные задачи:

- 1) описать морфологические свойства подводного рельефа Краснодарского вдхр. с использованием приемов геоморфометрии, определить основные формы рельефа котловины водохранилища и построить соответствующие карты;
- 2) установить многолетние морфометрические изменения, вызванные перестройкой подводного и надводного (мелководья, берега) рельефа, оценить интенсивность деформаций дна водохранилища;
- 3) выявить доминирующие процессы морфогенеза, установить закономерности осадконакопления, характер его проявления в рельефе ложа и береговой зоны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ выполнялся по данным батиметрических съемок Краснодарского вдхр., сделанных с участием авторов в 2005 и 2021 гг. Батиметрические съемки проведены в соответствии со сводом правил¹ и руководством²; методика проведения полевых исследований и обработки исходных материалов описана в работе [Лагута, Погорелов, 2018]. Морфометрический анализ и расчеты выполнялись с использованием предварительно построенных цифровых моделей рельефа дна водохранилища с пространственным разрешением 50 м (рис. 2). Поскольку в процессе трансформации водоема северо-восточная его часть (бывшее Тшикское вдхр.) отчленилась от основной чаши водоема, основные расчеты выполнены для регулируемого участка Краснодарского вдхр. площадью 224 км² (рис. 1).

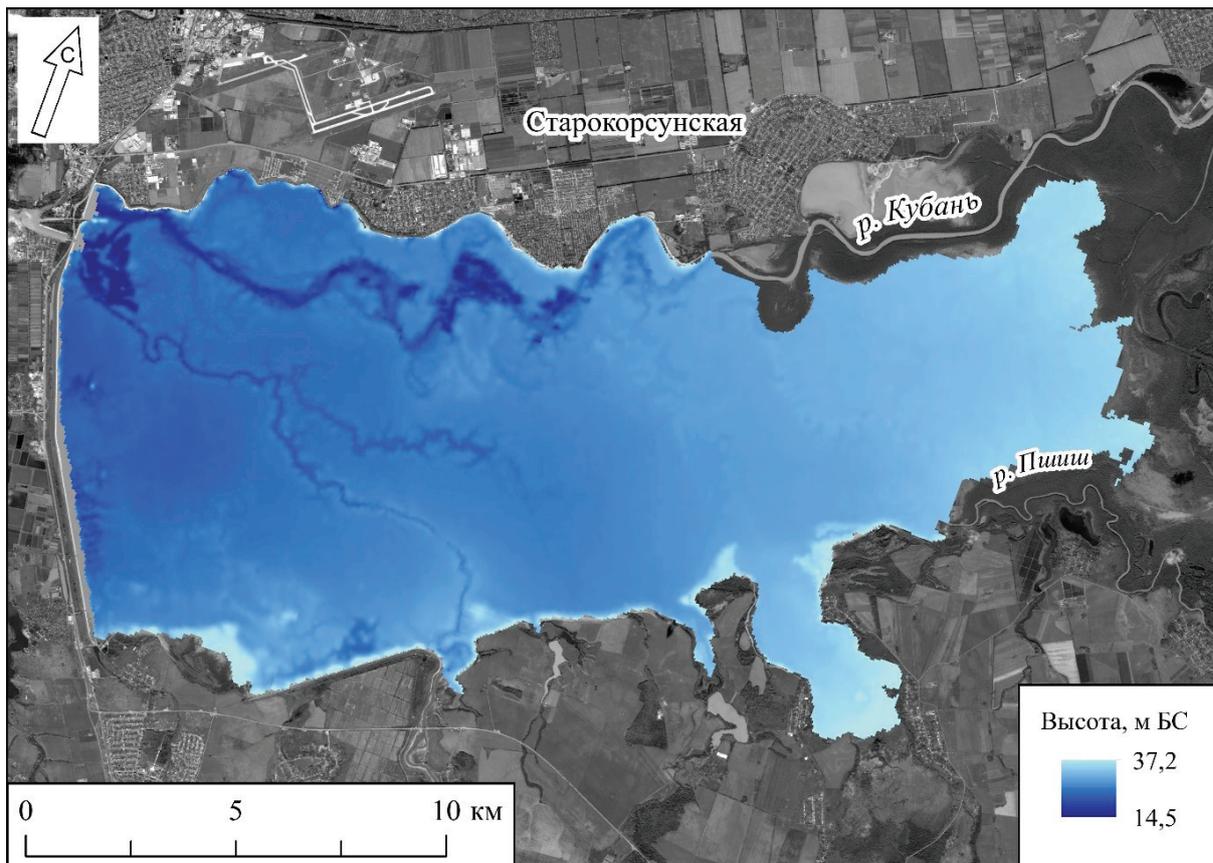


Рис. 2. Цифровая модель рельефа дна Краснодарского водохранилища, построенная по данным съемки 2005 г.

Fig. 2. Digital elevation model of the bottom of the Krasnodar Reservoir, built according to the 2005 survey data

В основе классификации морфометрических элементов поверхности дна Краснодарского вдхр. по ЦМР лежит метод расчета индекса BPI (Bathymetric Position Index) и классификации морфологических элементов на его основе [Guisan et al., 1999; Weiss, 2001]. Данный индекс, являясь модификацией индекса TPI (Topographic Positions Index) [Jenness, 2006], ориентирован на работу с материалами батиметрической съемки. До сих пор он применялся преимущественно для исследования рельефа морского дна [Wilson et al.,

¹ Инженерно-геодезические изыскания для строительства (СП 11-104-97). Свод правил. М., 1998. 139 с.
² РД 52.08.767-2012. Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами «Stream Pro» и «Rio Grande». ФГБУ «ГГИ» Росгидромета, 2012.

2007]. Индекс BPI является мультимасштабным и предполагает построение «грубого» (Broad-BPI) и детализированного (Fine-BPI) индексов растровых изображений. Расчету BPI предшествовало преобразование исходной ЦМР в батиметрическую модель; при этом в качестве нуля нами выбран форсированный уровень 35,23 м, а высотам присвоены отрицательные значения.

BPI представляет собой разность между абсолютной высотой данной точки (в растровом слое — ячейки) и средней высотой точек в заданном буфере вокруг исходной точки. Положительные значения индекса соответствуют выпуклостям поверхности; отрицательные — вогнутым формам; значения около 0 указывают на то, что поверхность близка к плоской. Для уменьшения влияния автокорреляции исходных данных на результаты морфометрической классификации использовано нормализованное значение индекса [Weiss, 2001]. Нормализация осуществлена по формуле (1):

$$BPI_{sd} = int \left(\left(\left(\frac{BPI - mean_{BPI}}{\sigma_{BPI}} \right) * 100 \right) + 0.5 \right), \quad (1),$$

где BPI_{sd} — нормализованная величина BPI,
 int — преобразование в целочисленное число,
 $mean_{BPI}$ — среднее значений индекса BPI (по всему набору данных),
 σ_{BPI} — среднее квадратическое отклонение значений индекса BPI (по всему набору данных).

Помимо растровых слоев индексов Fine-BPI и Broad-BPI, для распознавания (классификации) элементарных форм рельефа необходимы карта уклонов и батиметрическая карта. Количество классов, их наименование и морфометрические параметры задаются пользователем в формате CSV. Процедура выделения морфометрических элементов поверхности дна описана в работе [Verfaillie et al., 2007]. Нами экспериментально установлены параметры расчета индекса BPI, обеспечивающие оптимальный уровень детализации форм донного рельефа применительно к пространственному разрешению ЦМР. Использовано окно поиска в форме кольца с заданными внутренним и внешним радиусами (табл. 1). При выборе параметров мы руководствовались размерами распознаваемых положительных и отрицательных форм донного рельефа исследуемого водохранилища, которые относим к мезомасштабным, а именно — вдольбереговых валов с их гребнями и склонами, впадин и ложбин.

Табл. 1. Принятые параметры расчета индекса BPI
 Table 1. Accepted parameters for calculating the BPI index

Индекс	Форма окна поиска	Внутренний радиус		Внешний радиус	
		количество ячеек	м	количество ячеек	м
Fine-BPI	Кольцо	3	150	5	250
Broad-BPI	Кольцо	5	250	30	1500

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди морфометрических особенностей долинного Краснодарского вдхр., определяющих перестройку рельефа, выделим следующие. Рельеф дна водохранилища унаследовал как элементы речных долин с врезами русел (Кубани, Пшиша, Псекупса), так и обширные фрагменты плоской равнины, существовавшие до затопления в 1973–1976 гг.

Особенно хорошо прослеживается затопленное вблизи правого берега русло Кубани (рис. 2). Долине Кубани на участке водохранилища свойственна поперечная асимметрия, а именно — высокий обрывистый правый берег, спускающийся в старое русло Кубани, и пологий левый берег со слабо выраженной террасой. Между берегами располагается платообразная слабо расчлененная поверхность. В настоящее время в затопленных речных руслах отмечается повышенная в сравнении с фоновой аккумуляция наносов (рис. 1). В затопленном русле Кубани, имеющем максимальные глубины, происходит локализация мутьевого потока. Гидродинамическая активность здесь проявляется особым образом: струя в затопленном русле Кубани прижимается к правому берегу, что способствует интенсивному размыву берега до тех пор, пока не образуется аккумулятивное тело в виде выдвинутой дельты.

Преобладающий процесс в рельефообразовании ложа за исследуемый период — постепенное нивелирование его поверхности, выравнивание сверху в процессе непрерывного заиления. Средний слой заиления на исследуемой акватории за 2005–2021 гг. составил 0,40 м; изменчивость толщины слоя заиления на площади 224 км² характеризуется стандартным отклонением 0,81 м. Средний уклон поверхности ложа в 2005 г. составлял 0,20°, в 2021 г. — 0,18°. Уменьшение среднего уклона — очевидный признак постепенного выравнивания ложа при заилении. Повышенные уклоны на аккумулятивной равнине, как правило, маркируют затопленные береговые склоны речных долин.

На фоне указанных геоморфологических особенностей представляет интерес выделение элементарных форм рельефа согласно принятой методике (рис. 3), а также динамика преобразования этих форм за 2005–2021 гг. (рис. 3, табл. 2).

В процессе классификации поверхности ложа водохранилища выявлено 6 морфологических элементов (табл. 2, рис. 2), относящихся к 3 категориям поверхностей: плоские (плато), вогнутые (ложбины, впадины) и выпуклые (валы и их склоны). Рассмотрим происхождение и динамику каждой из них, а также выделенных элементарных форм рельефа чаши водохранилища.

По данным съемки 2021 г. 89,2 % площади водохранилища занято аккумулятивной платообразной равниной, которая до затопления представляла собой кубанскую пойму, расчлененную руслами рек. Преобладающие уклоны в пределах равнины — 0,1–0,4°. Понятие плато в наибольшей мере отражает основные свойства данной формы рельефа — плоскость, пологость.

Отрицательные формы — ложбинообразные углубления и более выраженные вытянутые впадины — занимают 2 % и 4,1 % площади соответственно. Генетически ложбины имеют различное происхождение: часть относится к затопленным руслам рек, часть — к вогнутым подножиям вдольбереговых аккумулятивных форм — валов. При этом старые русла в процессе заиливания и выполаживания эволюционируют в последовательности «впадина – ложбина – плато», а вновь формируемые русла (например, в дельте р. Пшиша) в ходе врезания образуют впадины. Наиболее сложно в морфологическом смысле построена береговая область и мелководная часть ложа (литораль), где наряду с положительными формами рельефа (вдольбереговые валы) на аккумулятивной отмели могут формироваться отрицательные формы (ложбины) на абразионной части отмели.

Хорошо выражены в рельефе затопленные долины рр. Кубани, Псекупса и Туапчи (бывший правый приток Псекупса). В течение исследуемого периода долины двух последних подверглись расчленению на отдельные участки и в настоящее время эволюционируют в сторону плато. В целом доля впадин в общей площади ложа водоема сокращается, чего нельзя сказать о ложбинах (табл. 2), часть которых формируется на участках вновь образующихся берегов флювиального происхождения — дельтах выдвигания.

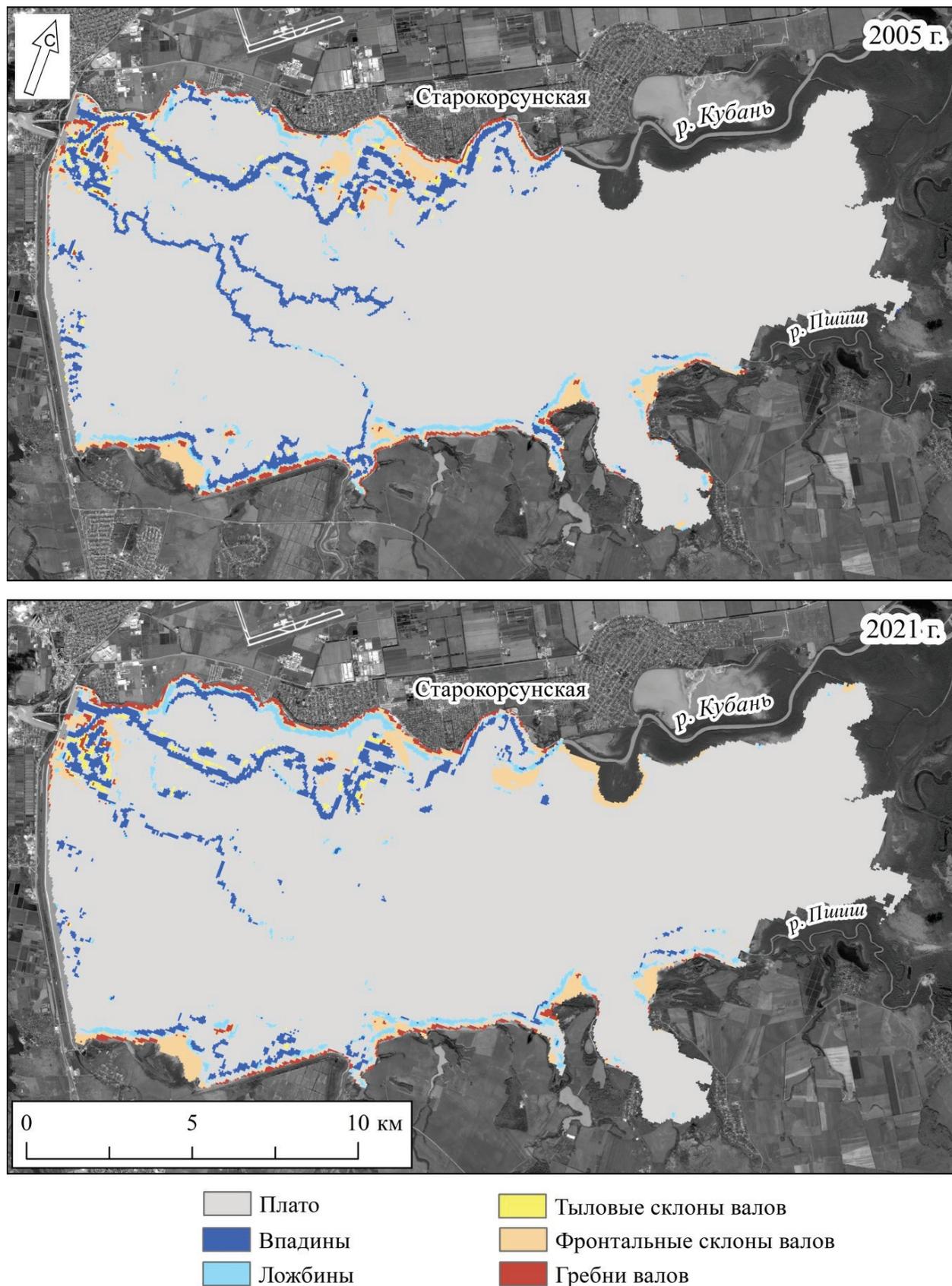


Рис. 3. Формы рельефа ложа водохранилища, выделенные по данным съемок 2005 и 2021 гг.
Fig. 3. Reservoir bed relief forms, selected according to surveys data from 2005 and 2021

Табл. 2. Морфологические элементы поверхности дна Краснодарского водохранилища и их изменение за 2005–2021 гг.

Table 2. Morphological elements of the bottom surface of the Krasnodar reservoir and their change in 2005–2021

Форма рельефа	2005 г.			2021 г.		
	Количество фрагментов	Площадь		Количество фрагментов	Площадь	
		га	%		га	%
Плато (Lower Bank Shelf)	280	19787	88,3	222	19984	89,2
Ложбины (Depressions)	258	387	1,7	257	438	2,0
Впадины (Deep Depression)	172	1172	5,2	184	919	4,1
Фронтальные склоны валов (Mid-Slope Ridges)	197	640	2,9	212	666	3,0
Гребни валов (Reef Crest)	208	317	1,4	166	295	1,3
Тыловые склоны валов (Back Reef)	144	98	0,4	92	98	0,4

Положительные элементы морфологии ложа представлены группой валообразных форм, внутри которой выделим 3 элементарные формы: гребни валов, фронтальные (дистальные) склоны и тыловые (проксимальные) склоны. Как и в случае с группой отрицательных форм рельефа, происхождение валов различно и генетически определяется вкладом аккумулятивных (флювиальных) и абразионных процессов (см. ниже). Расположение характерных генетически однородных элементарных форм рельефа иллюстрировано на рис. 4. Выделим следующие генетически однородные формы рельефа.

1. В литоральной зоне водохранилища (береговая отмель) как у абразионных, так и не поддающихся абразии берегов в результате поперечного перемещения наносов под воздействием прибоя сформированы аккумулятивные формы — береговые валы. Морфологически здесь выражены гребни и фронтальные (морские) склоны валов, а также ложбины, отделяющие береговой вал от нижележащего плато. Тыловые (обращенные к берегу) склоны не обнаруживаются в масштабе, обусловленном пространственным разрешением съемки. Снимки (рис. 5, а–е) ярко иллюстрируют серийность береговых валов, имеющую две основные причины — переменный подпор водохранилища и разную интенсивность волнения. Два указанных обстоятельства определяют пределы локализации рассматриваемой формы рельефа. Вдольбереговые валы также образуются под влиянием флювиального фактора морфолитогенеза — твердого речного стока с объемом в общем вещественном балансе, превышающим вклад прибоя. Естественное перемещение устья как источника наносов в процессе роста дельты вызывает постоянную смену условий формирования береговых валов, рождая их новые генерации с выходом старых валов из-под волнового воздействия (рис. 6 а–в).
2. В глубокой части ложа водохранилища сохранились прирусловые валы затопленных русел. Эта форма обнаруживается фрагментарно вдоль затопленного русла Кубани (рис. 3). Наличие рудиментов тыловых склонов валов (здесь — обращенных внутрь, к руслу), несмотря на потерю целостности, свидетельствует об их былой массивности.
3. Кроме перечисленных, валообразные формы образуются в виде косы или переймы (перешейка), соединяющей наносами существовавшие до затопления возвышенности с берегом при наличии волновой тени (эффект томболо) (рис. 7 а–г).

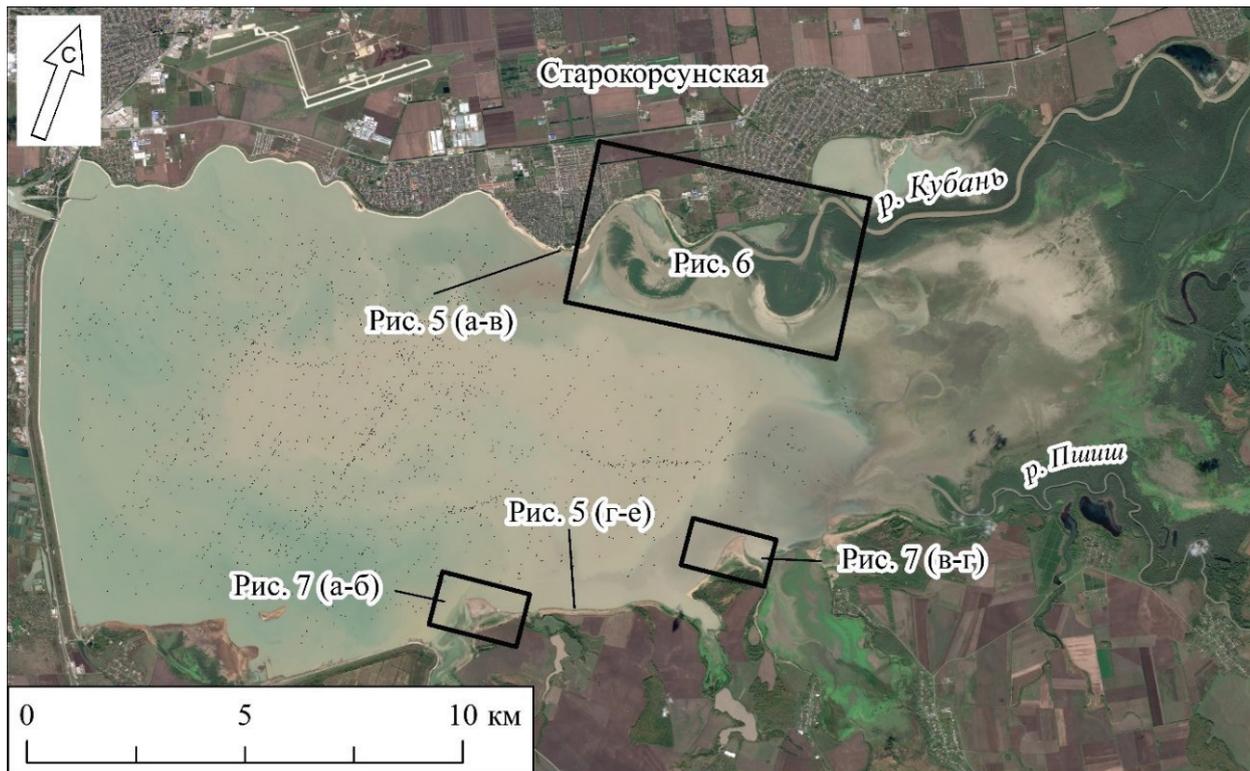


Рис. 4. Расположение типичных генетически однородных элементов рельефа
Fig. 4. Location of typical genetically homogeneous relief elements

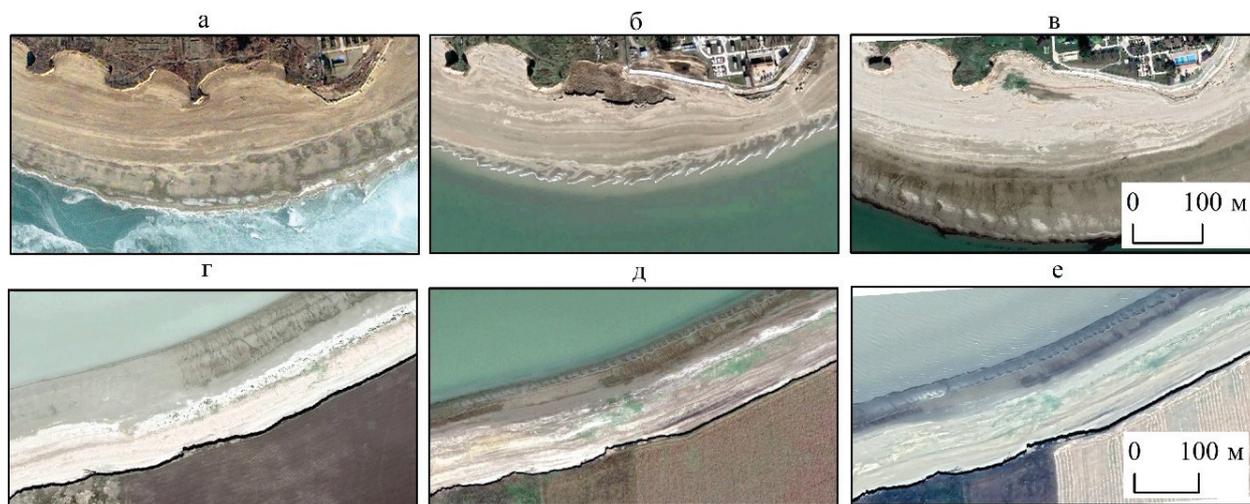


Рис. 5. Формирование характерных выпуклых форм рельефа — береговых валов и их склонов. Даты съемки 30.12.2012 (а), 24.11.2016 (б), 18.10.2018 (в), 09.09.2014 (г), 24.09.2014 (д), 28.09.2017 (е). Снимки Maxar Technologies

Fig. 5. Formation of characteristic convex relief forms — coastal reefs and their slopes. Imagery data: 30.12.2012 (a), 24.11.2016 (b), 18.10.2018 (c), 09.09.2014 (d), 24.09.2014 (e), 28.09.2017 (f). Images by Maxar Technologies



Рис. 6. Генерации береговых валов растущей дельты выдвижения р. Кубани. Даты съемки: 23.09.2014 (а), 18.10.2018 (б), 18.12.2022 (в). Снимки Maxar Technologies
Fig. 6. Generations of coastal reefs of the growing advanced delta of the Kuban River. Imagery data: 23.09.2014 (a), 18.10.2018 (b), 18.12.2022 (c). Images by Maxar Technologies



Рис. 7. Формирование валообразных форм рельефа в виде косы или переймы. Даты съемки 17.08.2005 (а), 28.09.2017 (б), 30.05.2013 (в), 30.12.2012 (г). Снимки Maxar Technologies — а, г; CNES / Airbus — б, в
Fig. 7. Formation of reef-like forms of relief in the form of a spit or tombolo. Imagery data: 17.08.2005 (a), 28.09.2017 (b), 30.05.2013 (c), 30.12.2012 (d). Images by Maxar Technologies — a, d; CNES / Airbus — b, c

Рассмотрим эволюцию донного рельефа. За анализируемый период морфологическим преобразованиям в наибольшей мере подверглись прибрежные участки дна, а также затопленные русла рек (рис. 8) и, соответственно, расположенные на этих участках элементарные формы рельефа. Всего преобразования затронули 34,1 км² или около 15 % анализируемой площади водохранилища. Дифференцированный характер морфологических преобразований отражает таблица 3.

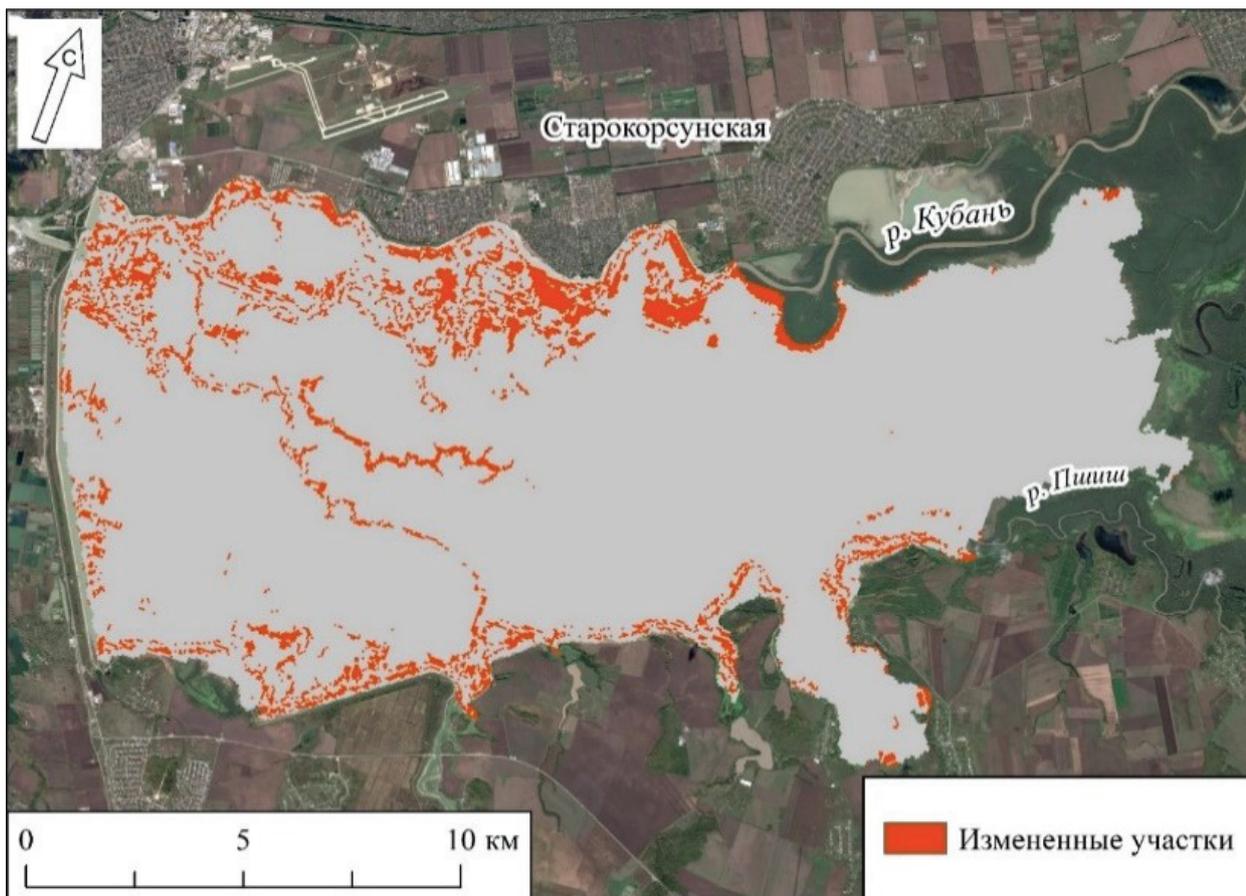


Рис. 8. Участки дна, подвергшиеся морфологическим изменениям за 2005–2021 гг.
 Fig. 8. Bottom areas subjected to morphological changes in 2005–2021

Табл. 3. Морфологические преобразования выделенных элементарных форм рельефа в течение 2005–2021 гг.

Table 3. Morphological transformation of the identified elementary landforms during 2005–2021

Формы рельефа		Площадь, га
2005 г.	2021 г.	
Плато	Тыловой склон вала	52
	Впадина	303
	Ложбина	179,25
	Фронтальный склон вала	232
	Гребень вала	31,5
Ложбина	Впадина	29
	Плато	165,75
	Фронтальный склон вала	11,75
	Гребень вала	0,75
	Тыловой склон вала	0
Впадина	Тыловой склон вала	6,5
	Ложбина	39,25

Формы рельефа		Площадь, га
2005 г.	2021 г.	
	Плато	525
	Фронтальный склон вала	6,75
	Гребень вала	5,75
Фронтальный склон вала	Тыловой склон вала	2
	Впадина	5,75
	Ложбина	36
	Плато	225,75
	Гребень вала	41,25
Тыловой склон вала	Впадина	7,5
	Ложбина	0,75
	Плато	53
	Фронтальный склон вала	0,5
	Гребень вала	9,5
Гребень вала	Тыловой склон вала	9,75
	Впадина	3,75
	Ложбина	4,75
	Плато	78,75
	Фронтальный склон вала	76,75

При анализе преобразования выпуклых форм необходимо учитывать следующее. Вследствие практически полного зарастания литорали водоема в зоне формирования новых дельтовых берегов большая часть береговых валов, вышедших и выходящих из зоны волнового воздействия, оказалась недоступна для батиметрической съемки 2021 г. Сравнение двух одновременных ЦМР не охватывает полностью границы съемки 2005 г. Среди выпуклых форм рельефа, выделенных в съемке 2005 г. (в границах сравнения), еще нет береговых валов, сформированных с участием флювиального процесса, хотя в съемке 2021 г. их доля в данной категории доходит до 30 %. При сопоставимых площадях выпуклых форм рельефа (гребней валов и выпуклых склонов валов) в 2005 г. и 2021 г. (табл. 2) следует отметить их существенные различия в генезисе, обусловленные, с одной стороны, появлением и развитием валов на потамогенных (дельтовых) берегах и, с другой стороны, сокращением площади валов вблизи берегов абразионного и денудационного типов. Значительная часть тыловых и фронтальных склонов — это новые формы, сформировавшиеся на бывшем плато, что отражает интенсивность образования новых берегов в водохранилище.

Преобразованиям подверглись и отрицательные формы поверхности. Площадь впадин имеет тенденцию к сокращению, площадь ложбин — увеличилась (табл. 2, 3). При этом количество обнаруженных впадин при общем сокращении их площади несколько увеличилось, что указывает на их дробление на отдельные фрагменты. Ярким примером «самоликвидации» впадин под действием заиливания служит бывшее русло р. Туапчи, следы которого в 2021 г. практически не обнаруживаются (рис. 3). Часть впадин преобразовалась в ложбины. Наряду с этим, как выяснилось, новые вогнутые формы образуются в пределах бывшего плато (около 40 % их общей площади), что вызвано врезанием формирующихся русел с образованием ложбин в аккумулятивной части отмели

и подводных откосах дельт. Так, участок нового подводного русла за 2005–2021 гг. образовался у р. Пшиша в виде ложбины на дельте выдвижения. Общая площадь вогнутых форм за исследуемый период в целом сократилась с 1559 до 1357 га вследствие, преимущественно, их заиливания.

Выделим доминирующий геоморфологический процесс эволюции ложа водохранилища — неуклонное нивелирование его поверхности, фактически выразившееся в росте площади плато за 16 лет на 2 км². Основными «донорами» процесса послужили впадины и фронтальные склоны (табл. 2, 3).

ВЫВОДЫ

Стандартные морфометрические характеристики водохранилищ, принятые в гидрометрии, ограничиваются видом, формой, высотным положением, размером ложа и объемом воды в водохранилище, а также батиграфическими кривыми. Приемы морфометрического анализа с использованием цифрового моделирования выводят анализ рельефа дна водоемов на новый уровень, способствуя пониманию процессов морфогенеза и направленности трансформации водохранилищ. Одним из эффективных инструментов геоморфометрии служит мультимасштабный индекс ВРІ (Bathymetric Position Index) с последующим выделением элементарных форм донного рельефа.

Ключевой геоморфологический процесс Краснодарского вдхр. — аккумуляция наносов, приводящая в целом к нивелированию поверхности ложа. Средний слой заиливания на исследуемой акватории за 2005–2021 гг. составил 0,40 м, однако толщина слоя заиливания при средних уклонах поверхности ложа около 0,2° весьма неравномерна. В рельефе котловины долинного Краснодарского вдхр., несмотря на почти полувековой период эксплуатации, хорошо сохранились затопленные долины рр. Кубани, Псекупса и Туапчи (бывший правый приток Псекупса).

В результате морфометрического анализа поверхности ложа Краснодарского вдхр. в пределах регулируемого объема на площади 224 км² по данным батиметрических съемок 2005 и 2021 гг. посредством ВРІ определены характерные формы рельефа, относящиеся к 3 категориям поверхностей: плоские (плато), вогнутые (ложбины, впадины) и выпуклые (гребни валов, тыловые или проксимальные склоны валов, фронтальные или дистальные склоны валов). В 2021 г. 89,2 % площади ложа водохранилища занимало плато, 4,1 % — впадины, 2 % — ложбины, 1,3 % — гребни вдольбереговых валов, 3 % — фронтальные склоны валов, 0,4 % площади — тыловые склоны валов. Установленные формы рельефа, несмотря на морфологическое подобие, могут иметь разный генезис. Так, часть ложбин образована затопленными руслами рек, часть — вогнутыми подножиями вдольбереговых аккумулятивных форм — валов. Происхождение валов также различно и определяется синергией флювиальных (валы дельтовых берегов) и абразионно-аккумулятивных процессов (вдольбереговые валы).

За 2005–2021 гг. морфологические преобразования затронули 34,1 км², или 15 % анализируемой площади водохранилища. В наибольшей мере перестройке подверглись прибрежные участки дна, а также затопленные русла рек. Часть затопленных долин (Псекупса, Туапчи и др.) оказались расчлененными на отдельные фрагменты и в процессе заиливания эволюционируют через стадии «впадина — ложбина — плато». Для эволюции плато, наоборот, характерна дефрагментация — уменьшение за исследуемый период количества фрагментов с 280 до 222 при увеличении площади платообразных поверхностей на 2 км². Общая площадь впадин имеет тенденцию к сокращению, а ложбин — к увеличению. Образование ложбин, как форм рельефа, при врезании русел отмечено на аккумулятивной отмели и подводных откосах формирующихся дельт выдвижения (Кубани, Пшиша). Непрерывной трансформации подвержены и положительные формы рельефа.

Значительная часть тыловых и фронтальных склонов — это новые образования, сформировавшиеся на бывшем плато.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № 22-27-20008.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project No. 22-27-20008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шаранов В.А.* Водохранилища. М.: Мысль, 1987. 331 с.
- Алексеевский Н.И., Беркович К.М., Чалов Р.С., Чалов С.Р.* Пространственно-временная изменчивость русловых деформаций на реках России. География и природные ресурсы, 2012. № 3. С. 13–21.
- Землянов И.В., Шикунова Е.Ю., Горелиц О.В., Павловский А.Е.* Использование цифровых моделей рельефа для уточнения современных морфометрических характеристик водохранилищ. Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Тр. межд. науч.-практ. конф. Пермь, 17–20 мая 2011 г. С. 189–193.
- Калинин В.Г., Пьянков С.В., Перевощикова О.А.* О формировании подводного рельефа дна долинных водохранилищ (на примере Камского). Географический вестник, 2018. № 1 (44). С. 128–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-1-128-137.
- Курбатова И.Е.* Мониторинг трансформации Краснодарского водохранилища с использованием спутниковых данных высокого разрешения. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т. 11. № 3. С. 42–53.
- Лагута А.А., Погорелов А.В.* Особенности заиления Краснодарского водохранилища. Опыт оценки по данным батиметрических съемок. Географический вестник, 2018. № 4 (47). С. 54–66. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-4-54-56.
- Лагута А.А., Погорелов А.В.* Особенности дельтоформирования рек, впадающих в долинное водохранилище (на примере Краснодарского водохранилища). Географический вестник, 2019. № 3 (50). С. 119–134. DOI: 10/17072/2079-7877-2019-3-119-134.
- Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю.* Река Кубань: гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. 500 с.
- Назаров Н.Н., Тюняткин Д.Г., Фролова И.В., Черепанов А.В.* Факторы и условия дифференциации наносов в береговой зоне камских водохранилищ. Географический вестник, 2011. № 4. С. 4–10.
- Назаров Н.Н., Тюняткин Д.Г., Фролова И.В., Черепанов А.В.* Морфолитогенез в зоне вдольберегового переноса наносов на Камском водохранилище (ст. 1. аккумулятивные формы). Географический вестник, 2013. № 1 (24). С. 33–39.
- Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселев Е.Н.* Новые сведения о заилении Краснодарского водохранилища по данным батиметрической съемки. Географический вестник, 2022. № 2 (61). С. 166–179. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-2-166-179.

Финаров Д.П. Геоморфологический анализ и прогнозирование переформирования береговой зоны и дна водохранилищ. Л.: Наука, 1986. 227 с.

Флоринский И.В. Геоморфометрия сегодня. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 2. С. 394–448. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Oxford: Elsevier, 2009. 765 p.

Guisan A., Weiss S.B., Weiss A.D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 1999. V. 143. P. 107–122.

Jenness J. Topographic Position Index (TPI). 2006. V. 1.2. 46 p.

Pogorelov A., Laguta A., Kiselev E., Lipilin D. Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban River, Russia. *Journal of Geographical Sciences*, 2021. V. 31. P. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7.

Verfaillie E., Doornenbal P., Mitchell A.J., White J., Van Lancker V. The bathymetric position index (BPI) as a support tool for habitat mapping, 2007. Электронный ресурс: https://www.researchgate.net/publication/242082725_Title_The_bathymetric_position_index_BPI_as_a_support_tool_for_habitat_mapping (дата обращения 01.03.2023).

Weiss A.D. Topographic positions and landforms analysis (conference poster). Proceedings of the 21st Annual ESRI User Conference. July 9–13. San Diego, CA, 2001.

Wilson M.F.J., O'Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Marine Geodesy*, 2007. V. 30. No. 1–2. P. 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962.

REFERENCES

Alekseevskii N.I., Berkovich K.M., Chalov R.S., Chalov S.R. Spatiotemporal variability in channel deformations on rivers of Russia. *Geography and Natural Resources*, 2012. No. 3. P. 13–21 (in Russian).

Avakyan A.B., Saltankin V.P., Sharapov V.A. Reservoirs. Moscow: Mysl', 1987. 331 p. (in Russian).

Finarov D.P. Geomorphological analysis and forecasting of the reformation of the coastal zone and the bottom of reservoirs. Leningrad: Nauka, 1986. 227 p. (in Russian).

Florinsky I.V. Geomorphometry today. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 2. P. 394–448 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Oxford: Elsevier, 2009. 765 p.

Guisan A., Weiss S.B., Weiss A.D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 1999. V. 143. 107–122.

Jenness J. Topographic Position Index (TPI). 2006. V. 1.2. 46 p.

Kalinin V.G., Pyankov S.V., Perevoshchikova O.A. On the formation of the underwater relief of valley reservoirs (by the example of the Kama Reservoir). *Geographical Bulletin*, 2018. No. 1 (44). P. 128–137 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2018-1-128-137.

- Kurbatova I.E.* Monitoring of the transformation of the Krasnodar reservoir using high resolution satellite data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2014. V. 11. No. 3. P. 42–53 (in Russian).
- Laguta A.A., Pogorelov A.V.* Peculiarities of Krasnodar water reservoir silting. Evaluation based on the data of bathymetric surveys. *Geographical Bulletin*, 2018. No. 4 (47). P. 54–66 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2018-4- 54-66.
- Laguta A.A., Pogorelov A.V.* Peculiarities of delta formation in rivers flowing into the valley reservoir (a case study of Krasnodar reservoir). *Geographical Bulletin*, 2019. No. 3 (50). P. 119–134 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2019-3-119-134.
- Lurie P.M., Panov V.D., Tkachenko Yu.Yu.* Kuban River: Hydrography and flow regime. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2005. 500 p. (in Russian).
- Nazarov N.N., Tyunyatkin D.G., Frolova I.V., Cherepanov A.V.* Factors and conditions of sediment differentiation in the coastal zone of the Kama reservoirs. *Geographical Bulletin*, 2011. No. 4. P. 4–10 (in Russian).
- Nazarov N.N., Tyunyatkin D.G., Frolova I.V., Cherepanov A.V.* Morpholithogenesis in the zone of alongshore sediment transport in the Kama Reservoir (St. 1. Accumulative forms). *Geographical Bulletin*, 2013. No. 1 (24). P. 33–39 (in Russian).
- Pogorelov A.V., Laguta A.A., Kiselev E.N.* New data on silting of the Krasnodar reservoir. *Geographical Bulletin*, 2022. No. 2 (61). P. 166–179 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2022-2-166-179.
- Pogorelov A., Laguta A., Kiselev E., Lipilin D.* Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban River, Russia. *Journal of Geographical Sciences*, 2021. V. 31. P. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7.
- Verfaillie E., Doornenbal P., Mitchell A.J., White J., Van Lancker V.* The bathymetric position index (BPI) as a support tool for habitat mapping, 2007. Web resource: https://www.researchgate.net/publication/242082725_Title_The_bathymetric_position_index_BPI_as_a_support_tool_for_habitat_mapping (accessed 01.03.2023).
- Weiss A.D.* Topographic positions and landforms analysis (conference poster). Proceedings of the 21st Annual ESRI User Conference. July 9–13. San Diego, CA, 2001.
- Wilson M.F.J., O’Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J.* Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Marine Geodesy*, 2007. V. 30. No. 1–2. P. 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962.
- Zemlyanov I.V., Shikunova E.Yu., Gorelits O.V., Pavlovsky A.E.* Using digital elevation models to refine modern morphometric characteristics of reservoirs. *Modern problems of reservoirs and their watersheds*. Scientific-practical conf. Perm, May 17–20, 2011. P. 189–193 (in Russian).
-