

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 556.555.6

doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-166-179

НОВЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАИЛЕНИИ КРАСНОДАРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ДАННЫМ БАТИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ

Анатолий Валерьевич Погорелов^{1✉}, Андрей Александрович Лагута², Евгений Николаевич Киселёв³

^{1, 3} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет», г. Краснодар, Россия

² Компания «АГМ Системы», г. Краснодар, Россия

¹ pogorelov_av@bk.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-5239-2785>, Scopus Author ID: 55536906800

² alaguta@icloud.com, <https://orcid.org/0000-0001-6587-0224>, Scopus Author ID: 57211746312

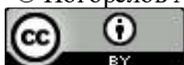
³ enkiselev@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1220-1275>, Scopus Author ID: 57213410193

Аннотация. По данным батиметрических съёмок анализируются пространственные особенности и многолетняя динамика заиления Краснодарского водохранилища – ключевого объекта всей мелиоративной системы Краснодарского края с ежегодным лимитом забора воды на орошение 3,35 млрд м³. Точные и актуальные оценки объемов заиления и изменения гидрометрических характеристик водохранилища необходимы для разработки правильной долгосрочной стратегии расходования водных ресурсов в регионе. Со времени запуска в эксплуатацию в 1973 г. водохранилище заметно трансформировалось, разделившись на два независимых водоема с образованием обширной перемычки из наносов рек Кубани и Белой, и продолжает непрерывно трансформироваться. В расчетах объемов заиления и гидрометрических характеристик Краснодарского водохранилища использованы батиметрические съёмки 2005, 2016 и 2021 гг. Установлено, что площадь зеркала за период 2005–2021 гг. с учетом отчленившегося Тшицкого водоема и образовавшейся перемычки при нормальном подпорном уровне сократилась с 382 до 224,2 км², полезный объем уменьшился с 1606 до 1270,4 млн м³. Мёртвый объем за это время уменьшился со 192 до 135,1 млн м³. За период между последними батиметрическими съёмками объём заиления составил 24,66 млн м³; средняя скорость заиления за 2016–2021 гг. (4,93 млн м³) оказалась меньше средней величины заиления за 2005–2016 гг. (6,86 млн м³). При фоновой толщине слое заиления за период между последними съёмками около 0,1 м наибольшие её значения (1–3 м и более) отмечены ниже выдвигающейся дельты Кубани на участке протяженностью более 2 км.

Ключевые слова: Краснодарское водохранилище, батиметрическая съёмка, цифровая модель рельефа, заиление, гидрометрические характеристики

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/123 и Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № 22-27-20008.

Для цитирования: Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н. Новые сведения о заилении Краснодарского водохранилища по данным батиметрической съёмки // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 2(61). С. 166–179. doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-166-179.



CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-166-179

NEW DATA ON SILTING OF THE KRASNODAR RESERVOIR**Anatoly V. Pogorelov^{1✉}, Andrey A. Laguta², Evgeny N. Kiselev³**^{1,3} Kuban State University, Krasnodar, Russia² AGM Systems LLC, Krasnodar, Russia¹ pogorelov_av@bk.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0002-5239-2785>, Scopus Author ID: 55536906800² alaguta@icloud.com, <https://orcid.org/0000-0001-6587-0224>³ enkiselev@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1220-1275>, Scopus Author ID: 57213410193

Abstract. The paper analyzes spatial features and long-term dynamics of silting of the Krasnodar Reservoir, the key object of the entire reclamation system of the Krasnodar region with a 3.35 billion m³ annual limit of water intake for irrigation; the analysis is based on bathymetric survey data. Accurate and up-to-date estimates of siltation volumes and changes in the hydrometric characteristics of the reservoir are necessary to develop a correct long-term strategy for the consumption of water resources in the region. The reservoir has noticeably transformed since it was put into operation in 1973: it has divided into two independent reservoirs with the formation of an extensive barrier from sediments of the Kuban and Belaya rivers, and transformations are continuing.

Bathymetric surveys of 2005, 2016, and 2021 were used to calculate the volumes of silting and hydrometric characteristics of the Krasnodar Reservoir. We have established that, taking into account the detached Tshchikskoe Reservoir and the bridge that has formed, over the period 2005–2021 the area of the mirror at a normal retaining level decreased from 382 to 224.2 km², while the useful volume diminished from 1,606 to 1,270.4 million m³. Over the same period, the dead volume decreased from 192 to 135.1 million m³. During the period between the last bathymetric surveys, the volume of siltation amounted to 24.66 million m³; the average siltation rate for 2016–2021 (4.93 million m³) was found to be lower than the average value for 2005–2016 (6.86 million m³). With a background thickness of the silt layer of about 0.1 m for the period between the last surveys, its greatest values (1–3 m and more) were noted below the protruding Kuban delta at a section of more than 2 km long.

Keywords: Krasnodar Reservoir, bathymetric survey, digital elevation model, silting, hydrometric characteristics

Funding: the research was carried out with financial support from the Kuban Science Foundation provided for scientific project No. MFI-20.1/123 and funding from the Russian Science Foundation and Kuban Science Foundation provided for scientific project No. 22-27-20008.

For citation: Pogorelov, A.V., Laguta, A.A., Kiselev, E.N. (2022). New data on silting of the Krasnodar Reservoir. *Geographical Bulletin*. No. 2(61). Pp. 166–179. doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-166-179.

Введение

Краснодарское водохранилище – крупнейший природно-техногенный объект, созданный в долине р. Кубани, с проектной площадью зеркала 400 км² и полезным объемом воды 2,4 км³ [13]. Это долинное водохранилище многофункционального назначения, предназначенное для регулирования весьма изменчивого многолетнего и внутригодового стока Кубани и её притоков в соответствии с режимом водопотребления и водопользования. Основные функции – защита от наводнения 600 тыс. га земель при пропуске паводка с расходом до 1500 м³/с и орошение более 210 тыс. га рисовых чеков в низовьях р. Кубани [20]. Краснодарское водохранилище служит ключевым объектом мощной мелиоративной системы, созданной за последние полвека в Краснодарском крае, которая, в свою очередь, является важнейшей составляющей всего агропромышленного комплекса края.

Картография и геоинформатика
Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н.

Воды р. Кубани активно разбираются на орошение, при этом водопотребление на сельскохозяйственные и другие нужды на фоне дефицита воды в степной зоне имеет тенденцию к увеличению. Средняя по краю оросительная норма для риса до последнего времени составляла более 19 тыс. м³/га [1; 15], что превышает проектное значение на 2,8 тыс. м³/га и приводит к увеличению водоподачи на рисовые поля [15]. Краснодарское водохранилище – основной источник орошения для посевов риса в Краснодарском крае с ежегодным лимитом забора воды на орошение около 3,35 млрд м³.

С момента запуска в эксплуатацию в 1973 г. Краснодарское водохранилище подверглось заметной трансформации [4; 5; 9; 10; 18; 23], постепенно разделившись в результате образования перемычки из отложений рек Кубани и Белой на два независимых водоема (рис. 1). Процесс многолетней трансформации сопровождается непрерывным уменьшением площади зеркала и полезной ёмкости водохранилища при одновременном увеличении площади перемычки, отложений надводной дельты Кубани и зарастающих мелководий практически на всей площади литорали [6; 7]. Все это свидетельствует о постепенном усилении признаков деградации водохранилища [18]. Основные этапы трансформации водохранилища в 1941–2018 гг., выделенные на основе карт и спутниковых снимков, рассмотрены в работах [7; 23].

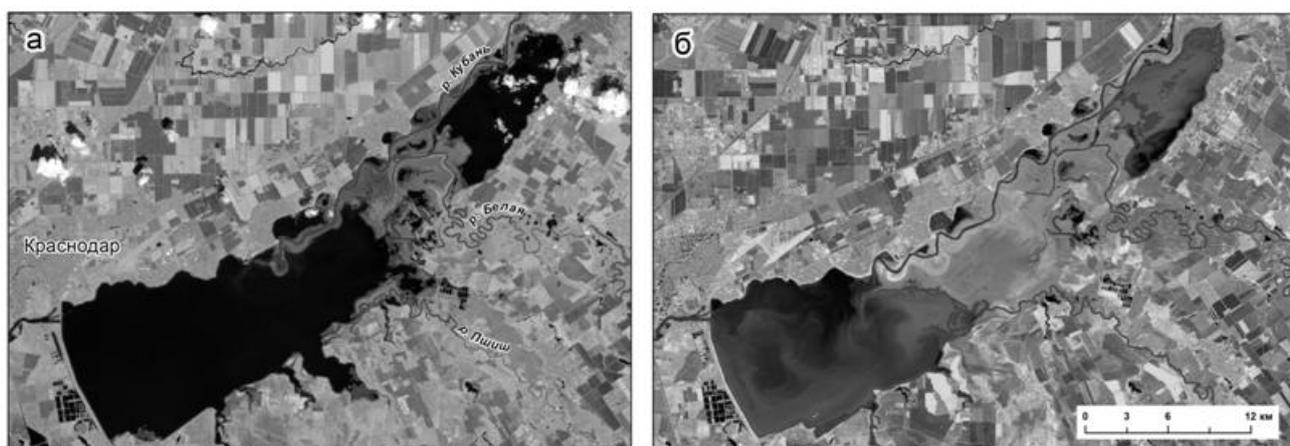


Рис. 1. Краснодарское водохранилище: а – 15.05.2021 при уровне воды 33,02 м (площадь 250,9 км²); б – 16.11.2021 при уровне воды 27,97 м (площадь 202,1 км²). Спутниковые снимки Sentinel-2A

Fig. 1. The Krasnodar Reservoir as of 15 May 2021 with the water level of 33.02 m (area of 250.9 km²) (a) and as of 16 November 2021 with the water level of 27.97 m (area of 202.1 km²) (b). Sentinel-2A satellite images

Значение Краснодарского водохранилища в водохозяйственном комплексе региона сложно переоценить. Недооценка скорости заиления водоёма и уменьшения его полезного объёма способна привести к череде неблагоприятных экономических и экологических последствий регионального масштаба. Отсюда, точные расчеты гидрометрических характеристик водохранилища и объёмов заиления на основе регулярных батиметрических измерений необходимы для разработки долгосрочной стратегии расходования водных ресурсов в Краснодарском крае.

Понимание механизмов и многолетней динамики заиления предполагает, как минимум, знание особенностей циркуляции вод и процессов эвтрофикации. Отчасти эти процессы проанализированы в статьях [11; 19]. Нами установлено, что преобладающие скорости течений, отражающие транспортирующую способность водных масс, изменяются в пределах от 0,02 до 0,5 м/с; наибольшие скорости зафиксированы в устьях Кубани и Пшиша – более 0,5 м/с [10]. В центральной и приплотинной частях акватории скорость течений, как правило, не превышает 0,05 м/с, в отдельных случаях снижаясь до 0,01 м/с. При впадении р. Кубани в водохранилище на мелководье происходит расширение русловой струи с усилением

Картография и геоинформатика
Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н.

турбулентности вовлекаемых в движение водных масс. Струйное движение воды с повышенной скоростью течения отмечено в затопленном русле р. Кубани с затуханием энергии речной струи на расстоянии 1,5–2,0 км от вершины дельты.

Вместе с тем следует признать, что информационное обеспечение актуальных оценок трансформации Краснодарского водохранилища до сих пор не отвечает его региональной водохозяйственной и экологической значимости, что вызывает естественную озабоченность, прежде всего, у водопользователей и мелиораторов.

В настоящей работе ставились задачи по данным батиметрических съёмок: определить объём тела заиления за период между съёмками (2016–2021 гг.), выявить ключевые особенности и тенденции процесса заиления. Решение указанных задач предполагало:

- построение цифровой модели рельефа (ЦМР) по данным батиметрической съёмки водохранилища 2021 г.;
- расчет актуальных морфометрических характеристик водоема (площади зеркала, объёмы при характерных уровнях и др.);
- расчет объёма заиления и установление основных особенностей распределения наносов в чаше водохранилища;
- оценка тренда изменения объёма воды в водохранилище для характерных уровней на ближайшие десятилетия.

Методы и материалы

В качестве исходных материалов для построения цифровой модели рельефа использованы данные батиметрической съёмки Краснодарского водохранилища, выполненной нами в июле – октябре 2021 г. Методика проведения съёмки изложена в [6]. Батиметрическая съёмка выполнялась профилографами «Rio Grande 1200 kHz» и «Sontek 701» [22], навигация – эхолотом-картплотером Garmin 585 (рис. 2).



Рис. 2. Маломерное судно, оборудованное для выполнения гидрометрических измерений в Краснодарском водохранилище. 11.08.2021

Fig. 2. A small vessel equipped to perform hydrometric measurements in the Krasnodar Reservoir, 11 August 2021

Межгалсовые расстояния при батиметрической съёмке водохранилища заданы равными 100 м в соответствии с [21] (рис. 3). Направления всех промерных галсов установлены параллельными главной плотине водохранилища с дирекционным углом галсов 151–331°.

Картография и геоинформатика
Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н.

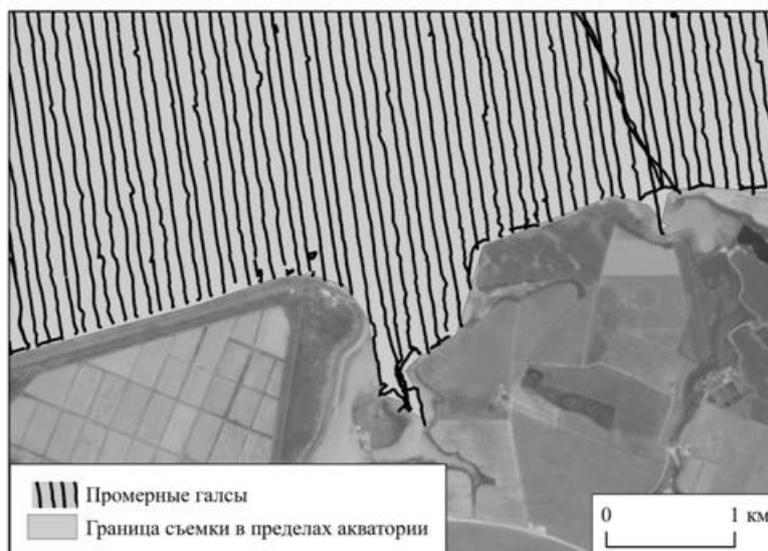


Рис. 3. Расположение промерных галсов в юго-восточной части акватории
Fig. 3. Location of sounding lines in the southeastern part of the water area

Батиметрическая съёмка в пределах основной чаши Краснодарского водохранилища проведена по 253 галсам. Средняя протяженность промерного галса в основной чаше водохранилища от одного берега до другого составила около 9 км при максимуме около 12 км в приплотинной части водохранилища. При этом средние расстояния между промерными точками составляли 4,31 м. Суммарная протяженность промерных маршрутов, пройденных при батиметрической съёмке Краснодарского водохранилища в 2021 г., составила 2653 км с общим количеством точек измерения глубин 1,001 млн. Общая отработанная площадь водной поверхности Краснодарского водохранилища (без учета заливов) в период проведения батиметрической съёмки 2021 г. в основной чаше Краснодарского водохранилища составила 224 км². Для сравнения: при выполнении съёмки в 2016 г., охватившей и акваторию Тщикского водоема (площадь 51 км²), протяженность промерных маршрутов составила 3525 км с 1,451 млн точек измерения глубин. Исходными уровнями водной поверхности Краснодарского водохранилища в период проведения батиметрической съёмки служили регулярные измерения уровня, публикуемые Кубанским бассейновым водным управлением [16].

ЦМР чаши Краснодарского водохранилища по состоянию на 2021 г. построена с пространственным разрешением, соответствующим плотности исходных промерных точек. Для создания ЦМР использовались инструменты Spatial Analyst программного комплекса ArcGIS (Esri). Заданное пространственное разрешение позволяет анализировать морфометрические особенности дна водоема в масштабе мезо- и микроформ рельефа (затопленные русла, уступы устьевых баров и взморья, прирусловые валы, ямы и т.п.). Объем тела заиления рассчитывался как разность ЦМР. Расчет объемов и площадей зеркала водохранилища в 2021 г. выполнен для характерных уровней – НПУ и УМО. Расчеты основных морфометрических характеристик водоема проводились стандартными способами [3].

Основные результаты

По материалам батиметрических измерений 2021 г. построены гипсометрическая карта дна (рис. 4) и карта глубин (рис. 5) водохранилища. Чаша водоёма представляет собой затопленную долину Кубани; поверхность дна характеризуется постепенным понижением абсолютных отметок с востока на запад в сторону приплотинной части. Морфология дна осложнена врезами левобережных притоков, разделяющими затопленную пойму

Картография и геоинформатика
 Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н.

на депрессии с отметками, лежащими ниже прирусловых валов этих притоков. Несмотря на почти полувековой период эксплуатации водохранилища, затопленные русла рек Кубани, Пшиша и Псекупса вне участков высокой аккумуляции наносов хорошо сохранились и имеют отчётливую морфологическую выраженность (рис. 5). В северо-западной части водоёма в рельефе дна отмечены искусственные ямы – результат изъятия донных отложений на строительные нужды.

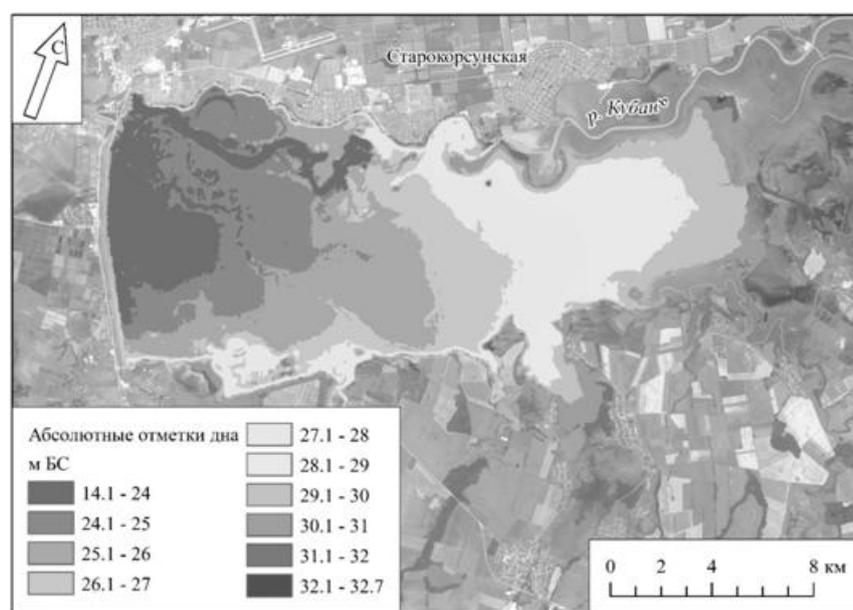


Рис. 4. Гипсометрическая карта дна Краснодарского водохранилища. 2021 г.
 Fig. 4. Hypsometric map of the bottom of the Krasnodar Reservoir, 2021

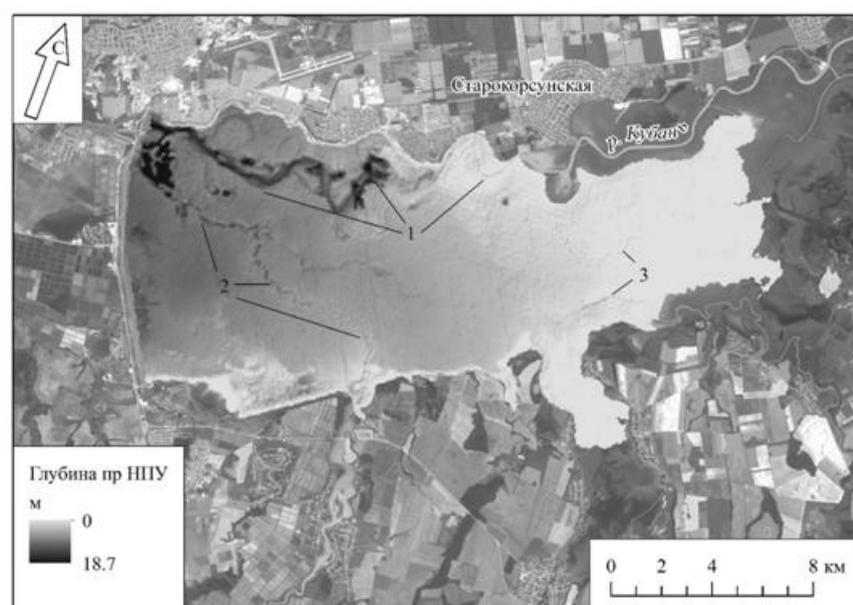


Рис. 5. Глубина Краснодарского водохранилища при нормальном подпорном уровне (НПУ). 2021 г.
 Затопленные русла рек: 1 – Кубань; 2 – Псекупс; 3 – Пшиш
 Fig. 5. . Depth of the Krasnodar Reservoir at a normal backwater level (2021). The numbers show flooded channels of the Kuban (1), Psekups (2) and Pshish (3) rivers

Современные гидрометрические характеристики Краснодарского водохранилища в сравнении с характеристиками по материалам съемок разных лет приведены в таблице.

Картография и геоинформатика
Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н.

Основные гидрометрические характеристики Краснодарского водохранилища по данным съёмок разных лет и проектному положению

The main hydrometric characteristics of the Krasnodar Reservoir according to survey data from different years and the design parameters

Показатель	Проектные характеристики (1973 г.)	Характеристики по данным съёмок за разные годы			
		1985–1986 г.	2004–2005 г.	2016 г.*	2021 г.*
Объём, млн м ³					
При ФПУ	3048	2987	2793	–	–
При НПУ 33,65 м	2396	2347	2149	–	–
При НПУ 32,75 м	–	–	1798 (1532,14*)	1448,94	1405,48
При УМО	236	221	192	151,42	135,07
Полезный объём при НПУ=33,65 м	2160	2126	1957	–	–
Полезный объём при НПУ=32,75 м	–	–	1606	1297,52	1270,41
Мертвый объём	236	221	192	151,42	135,07
Площадь зеркала, км ²					
При ФПУ	419,5	413	417,6	–	–
При НПУ 33,65 м	400	394	–	–	–
При НПУ 32,75 м	–	–	382,0	229,03	224,16
При УМО	128	127	115,7	99,58	91,27
Глубина, м					
Средняя	7,0	6,0	6,72	6,33	6,27
Площадь мелководий (до 2 м), км ² /%					
При НПУ=32,75 м	Не определялась	34/8,6	121/31,7	40,3/17,6*	44,5/19,5*

Примечание. Символом (*) показаны данные без учета Тшикского водоема и образовавшейся надводной перемычки.

Note. The symbol (*) shows data not taking into account the Tshchikskoe Reservoir and the above-water dam that has formed

Важнейшим показателем динамики водохранилища является продолжительность его заиления, которая оценивается с учетом мёртвого объёма, среднего годового объёма наносов и транзитной части наносов [3]. При расчетах объёма заиления таким способом необходимо знать плотность накапливающихся донных отложений, включая органические осадки, и уплотнение донных отложений со временем. Приходная часть баланса наносов для водохранилища определяется поступлением наносов с речным стоком и продуктами размыва берегов, расходная – аккумуляцией наносов в водохранилище и их транзитным сбросом с водой. Априори понятно, что в ходе эксплуатации водохранилища изменяются как абсолютные значения и соотношения составляющих аккумуляции (взвешенные наносы, продукты размыва берегов, органические осадки), так и значения транзитного выноса наносов.

Количественный вклад размыва берегов в баланс наносов водохранилища на основе регулярных измерений не изучался. Занесение водохранилища продуктами абразии происходит преимущественно за счет переформирования высокого правого берега по абразивно-обвальному типу с формированием волноприбойных ниш, карнизов и абразионных останцов (рис. 6). Так, в 1975–1998 гг. размыв крутого правого берега в процессе абразионной переработки на верхнем участке водохранилища составил 28 м, на среднем – 33 м, на нижнем – 40 м. По оценкам [14] в общем объёме наносов на речные наносы приходится 86,3%, на продукты разрушения берегов – 13,7%, из которых 12,1% поступает с правого берега. В работе [12] для 2017 г. объём наносов за счет переработки берегов оценивается в 1,57 млн м³, но при этом способ и исходные данные для расчёта не указаны.

Картография и геоинформатика
 Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н.



Рис. 6. Правый берег Краснодарского водохранилища в районе х. Ленина 09.06.2019 (вверху),
 24.01.2020 (внизу)

Fig. 6. The right bank of the Krasnodar Reservoir in the area of khutor Lenina as of 09 June 2019 (above) and 24 January 2020 (below)

В нашем случае об объёмах заиления и динамике объёма водохранилища следует судить непосредственно по материалам батиметрических измерений (таблица). За период с 2004 по 2021 г. без учета Тшикского водоема (и образовавшейся перемычки) объём водохранилища при НПУ=32,75 м сократился на 127 млн м³.

На графике (рис. 7) отражена динамика изменения объёма водохранилища при уровнях НПУ и УМО с экстраполяцией соответствующих показателей на ближайшие десятилетия. Полагаем, что график в первом приближении дает представление о сроках заиления

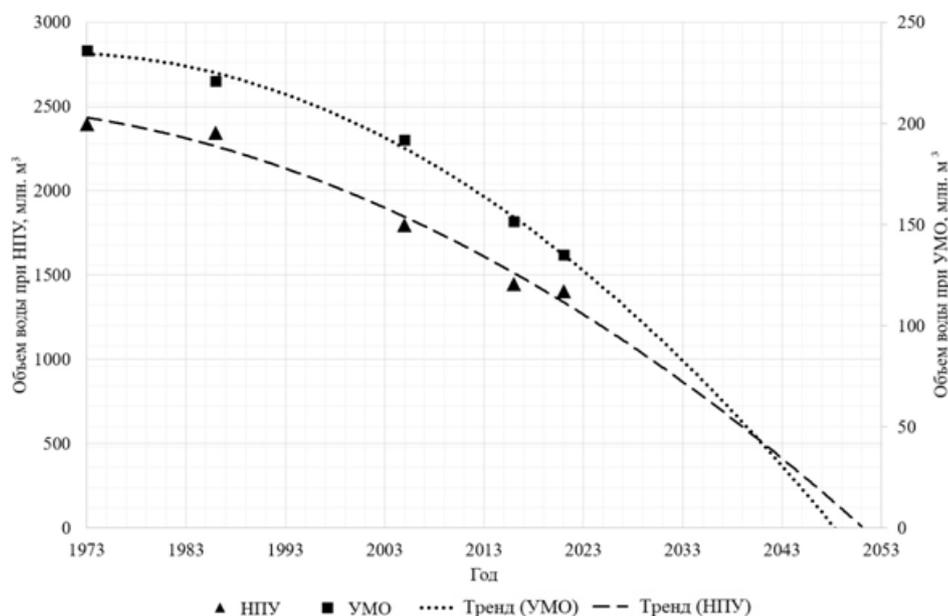


Рис. 7. Динамика изменения объёма воды в Краснодарском водохранилище при нормальном подпорном уровне и при уровне мёртвого объёма. В 1993 г. НПУ был снижен с отметки 33,65 м до 32,75 м

Fig. 7. Dynamics of changes in the volume of water in the Krasnodar Reservoir at a normal backwater level (NBL) and at a dead volume level. The NBL lowered from 33.65 m to 32.75 m in 1993.

Картография и геоинформатика
 Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н.

О распределении донных отложений известно мало. По оценкам [2] наибольших значений (3 м) толщина наносов достигает в затопленных руслах рек Кубань, Белая; при этом толщина отложений вниз по водохранилищу уменьшается и в 1994 г. в приплотинной зоне составляла около 1,75 м. Однако систематические измерения этих показателей, позволяющие непосредственно судить об интенсивности отложений наносов, в исследуемом водохранилище не ведутся.

Обратимся к заилению водохранилища по данным выполненных нами съёмок. Карта распределения слоя заиления, полученная как разность построенных ЦМР 2021 г. и 2016 г., т.е. за период между последними батиметрическими съёмками, приведена на рис. 8. В соответствии с расчетами объём заиления Краснодарского водохранилища за 2016–2021 гг. для площади 224 км² (таблица) составил 24,66 млн м³, т.е. в среднем 4,93 млн м³ в год. Этот показатель меньше среднегодовой величины, полученной нами ранее за период 2005–2016 гг. для площади 229 км² (6,86 млн м³ в год) [6].

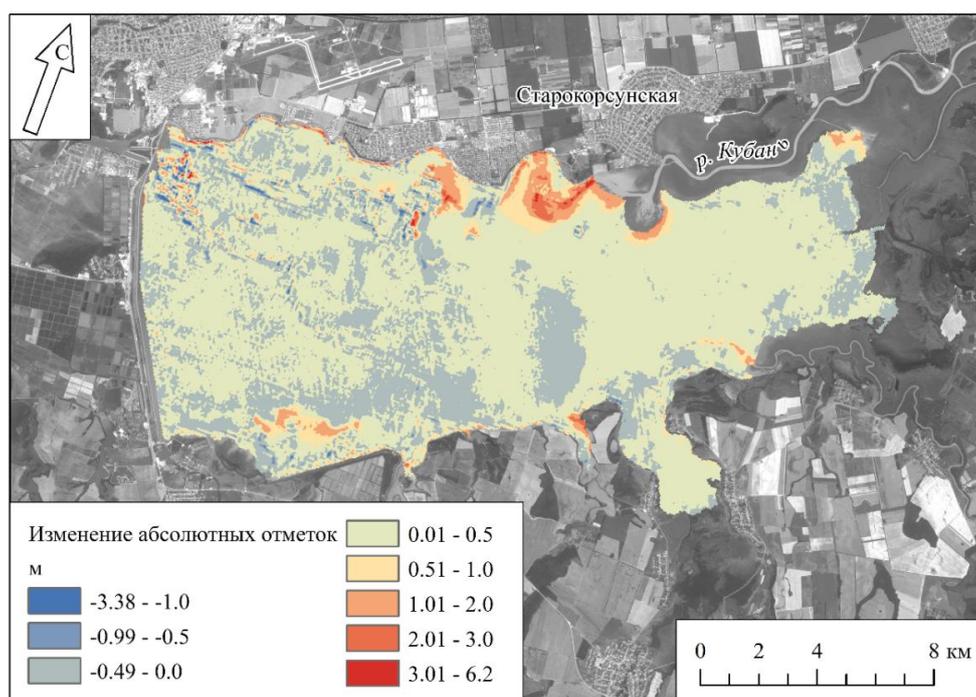


Рис. 8. Приращение слоя заиления Краснодарского водохранилища за период 2016–2021 гг.

Fig. 8. Increment of the siltation layer of the Krasnodar Reservoir over the period 2016–2021

Судя по нашим расчетам (рис. 8), слой заиления за 2016–2021 гг. имеет относительно равномерное, плащевидное распределение, особенно характерное для восточной части озерной котловины с меньшими глубинами. Исключения, по понятным причинам, составляют устьевые взморья и придельтовые участки, в пределах которых происходит падение скоростей течения с отложением донных наносов повышенной крупности. В пределах устьевых взморья Кубани с 2016 по 2021 г. отложилось 9,36 млн м³ твёрдого стока, т.е. 38% общего объёма приращения тела заиления. На большей части исследуемой котловины на площади около 140 км², как и в предыдущие годы [6], отмечено незначительное приращение слоя заиления в 0,01–0,5 м. Вниз по течению толщина слоя отложений в целом уменьшается.

Аномально высокие значения слоя заиления за 2016–2021 гг. (2–3 м и более) отмечены в районе непрерывно выдвигающейся дельты Кубани с формирующейся надводной ее частью между станицей Старокорсунской и хутором Ленина. Здесь на участке

Картография и геоинформатика
Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н.

своеобразной авандельты в соответствии с установленным затуханием энергии русловой струи Кубани [10] наблюдается повышенное отложение наносов. За 2016–2021 гг. область с высокой скоростью заиления в дельте Кубани со слоем отложений более 1 м закономерно сместилась на запад на 2–4 км, образовав у правого берега дугообразное аккумулятивное тело с обширным мелководьем, которое практически полностью нивелировало в рельефе дна фрагменты бывшего русла. Положение и форма этого аккумулятивного тела соответствуют положению устья Кубани при разных уровнях воды в водохранилище. Так, в маловодный 2020 г. в устье оно достигало уровня мёртвого объёма. Вполне объяснимо в связи с этим, что надводный рукав с дельтовым каналом за обозначенный период удлинился на 2,5 км (рис. 1, 7), приблизившись к изогипсе 27 м и еще сохранившимся наиболее глубоким участкам затопленного русла Кубани.

Заключение

1. В мелиоративном комплексе Краснодарского края с площадью оросительных рисовых систем более 234 тыс. га [17] Краснодарское водохранилище является ключевым объектом. Известно, что валовый сбор риса на Кубани составляет более 80% общероссийского. Неправильные оценки изменений полезного объёма и скорости заиления водохранилища способны привести к комплексу неблагоприятных экономических и экологических последствий регионального масштаба. Разработка долгосрочной стратегии использования водных ресурсов в Краснодарском крае должна опираться на расчёты гидрометрических характеристик Краснодарского водохранилища и объёмов заиления в их многолетней динамике.

2. Материалы батиметрических съёмок 2005, 2016 и 2021 гг. дают возможность на основе полученных ЦМР получить объективные оценки заиления и рассчитать необходимые гидрометрические характеристики, а также отследить основные особенности и тренды трансформации водоёма.

3. По данным построенных карт, включая карту толщины слоя заиления, установлено, что за период между последними съёмками (2016–2021 гг.) объём заиления на площади 224 км² составил 24,66 млн м³, а средняя скорость заиления оказалась равной 4,93 млн м³/год. Уменьшение среднегодовых объёмов заиления в сравнении с периодом 2005–2016 гг. (6,86 млн м³) предположительно может быть связано с постепенным сокращением площади зеркала водохранилища, а также с межгодовой изменчивостью речного стока, определяющей вещественный обмен в исследуемом водоеме. Признаками деградации водохранилища следует считать и рост относительной площади мелководий, которая в исследуемом водоеме за 2016–2021 гг. увеличилась с 17,6 до 19,5%.

4. Среднее приращение тела заиления в водохранилище за этот период составило 7 см. Повышенное отложение наносов за 2016–2021 гг. слоем 2–3 м и более зафиксировано в районе непрерывно выдвигающегося рукава дельты Кубани с дельтовым каналом, где формирующееся аккумулятивное тело соответствует положению устья реки в разные фазы водного режима. На участке устьевого взморья Кубани за 2016–2021 гг. отложилось 38% всего объёма наносов.

Список источников

1. *Владимиров С.А., Хатхоку Е.И., Ткаченко В.Т.* Режимы орошения и техника полива сельскохозяйственных культур: учеб. пособие. Краснодар: КубГАУ, 2016. 112 с.

2. *Данекер Б.А., Ефремов Ю.В., Антошкина Е.В.* Современные сведения о крупных водохранилищах Краснодарского края // География Краснодарского края: антропогенное воздействие на окружающую среду: сб. науч. ст. Краснодар: Изд-во Кубан. гос. ун-та, 1996. С. 56–70.

Картография и геоинформатика
Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н.

3. *Догановский А.М., Орлов В.Г.* Сборник задач по определению основных характеристик водных объектов суши: учеб. пособие. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2011. 315 с.
4. *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.
5. *Курбатова И.Е.* Спутниковый мониторинг экологической катастрофы на Краснодарском водохранилище летом 2020 г. и ее природные и антропогенные предпосылки // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 5. С. 328–334.
6. *Лагута А.А., Погорелов А.В.* Особенности заиления Краснодарского водохранилища. Опыт оценки по данным батиметрических съемок // *Географический вестник = Geographical bulletin*. 2018. № 4(47). С. 54–66. doi: 10.17072/2079-7877-2018-4-54-66.
7. *Лагута А.А., Погорелов А.В.* Изменение морфометрических характеристик Краснодарского водохранилища за период эксплуатации (1973–2018 годы) // *Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС»*. 2019; 25(2): 5–15. doi: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-5-15
8. *Лагута А.А., Погорелов А.В.* Особенности дельтоформирования рек, впадающих в долинное водохранилище (на примере Краснодарского водохранилища) // *Географический вестник = Geographical bulletin*. 2019. № 3(50). С. 119–134. doi: 10/17072/2079-7877-2019-3-119-134
9. *Лагута А.А., Погорелов А.В.* Трансформация Краснодарского водохранилища (1941–2018 гг.) // *Известия высших учебных учреждений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2019. № 3. С. 45–54. doi: 10.23683/0321-3005-2019-3-45-54.
10. *Лагута А.А., Погорелов А.В.* Анализ заиления и гидродинамических процессов в деградирующем пойменно-долинном водохранилище (на примере Краснодарского водохранилища) // *Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС»*. 2020; 26(2): 335–348. doi: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-335-348.
11. *Лагута А.А., Погорелов А.В.* Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла «а» в Краснодарском водохранилище по данным спутниковых снимков // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 4. С. 67–84. doi: 10.35567/1999-4508-2021-4-4.
12. *Литовка Ф.С., Бандурин М.А., Ванжа В.В.* Пути решения проблемы заиления Краснодарского водохранилища для рационального использования ресурсов пойменных территорий // *Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона»*. 2019. № 7.
13. *Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю.* Река Кубань: гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 500 с.
14. *Лурье П.М., Панов В.Д.* Реки бассейна Азовского моря: гидрография и режим стока. Ростов н/Дон.: Донской издательский дом, 2021. 670 с.
15. *Малышева Н.Н., Якуба С.Н.* Развитие мелиорации на Кубани и рациональное водопользование при орошении риса // *Рисоводство*. 2017. № 4(37). С. 47–56.
16. Официальный сайт Кубанского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kbvufgu.ru/> (дата обращения: 15.02.2022).
17. *Пищенко Д.А., Гаркуша С.В., Тешева С.А.* Эффективность выращивания риса в Краснодарском крае // *Масличные культуры*. 2020. Вып. 3(183). С. 103–106.
18. *Погорелов А.В., Литилин Д.А., Курносова А.С.* Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // *Географический вестник = Geographical bulletin*. 2017. № 1(40). С. 130–137. doi: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137.

Картография и геоинформатика
Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н.

19. Погорелов А.В., Лагута А.А. О циркуляции вод в долинном водохранилище (Краснодарское водохранилище) // Известия высших учебных учреждений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2020. № 4. С. 87–97. doi: 10.18522/1026-2237-2020-4-87-97.

20. Правила использования водных ресурсов Краснодарского водохранилища. ПИИ «Кубаньводпроект». Краснодар, 2008. 158 с.

21. Руководство по топографической съёмке шельфа и внутренних водоемов (ГКИНП-11-157-88). М.: ЦНИИГАиК, 1989.

22. РД 52.08.767-2012. Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами "Stream Pro" и "Rio Grande. М.: Росгидромет, 2012.

23. Pogorelov Anatoly, Laguta Andrey, Kiselev Evgeny, Lipilin Dmitry. Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban river, Russia // Journal of Geographical Sciences. 2021. Vol. 31. 1895–1904 pp. doi: 10.1007/s11442-021-1928-7.

References

1. Vladimirov, S.A. Hathohu, E.I., Tkachenko, V.T. (2016), *Rezhimy` orosheniia i tekhnika poliva sel`skohoziai`stvenny`kh kul`tur: ucheb. posob.* [Irrigation regimes and irrigation technique for crops], Krasnodar: KubGAU.

2. Daneker, B.A. Efremov, Iu.V., Antoshkina, E.V. (1996), *Sovremenny`e svedeniia o krupny`kh vodokhranilishchakh Krasnodarskogo kraia* [Modern information about large reservoirs of the Krasnodar Territory], *Geografiia Krasnodarskogo kraia: antropogennoe vozdei`stvie na okruzhaiushchuiu sredu: sbornik nauchny`kh statei`*, Krasnodar, Kubanskiy gosuniversitet, pp. 56–70.

3. Doganovskii, A.M., Orlov, V.G. (2011), *Sbornik zadach po opredeleniyu osnovnykh kharakteristik vodnykh obyektov sushu.* Uchebnoye posobiye [Collection of tasks for determining the main characteristics of water bodies on land. Tutorial], Saint Petersburg: RSHU.

4. Kurbatova, I.E. (2014), *Monitoring trasformatsii Krasnodarskogo vodokhranilisha s ispolzovaniyem sputnikovykh dannykh vysokogo razresheniya* [Monitoring of the transformation of the Krasnodar Reservoir using high resolution satellite data], *Actual problems of remote sensing of the Earth from space*, vol. 11, no. 3, pp. 42–53.

5. Kurbatova, I.E. (2021), *Sputnykovy`i monitoring e`kologicheskoi` katastrofy` na Krasnodarskom vodokhranilishche letom 2020 g. i ee prirodny`e i antropogenny`e predposy`lki* [Satellite monitoring of the ecological catastrophe at the Krasnodar reservoir in the summer of 2020 and its natural and anthropogenic preconditions], *Actual problems of remote sensing of the Earth from space*, vol. 18, no. 5, pp. 328–334.

6. Laguta, A.A., Pogorelov, A.V. (2018), *Osobennosti zaileniya Krasnodarskogo vodokhranilishcha. Opyt otsenki po dannym batimetriceskikh s`emok* [Features of siltation of the Krasnodar reservoir. Evaluation experience from bathymetric surveys], *Geograficheskiy vestnik = Geographical bulletin*, no. 4(47), pp. 54–66. doi: 10.17072/2079-7877-2018-4-54-66.

7. Laguta, A.A., Pogorelov, A.V. (2019), *Izmenenie morfometriceskikh kharakteristik Krasnodarskogo vodokhranilishcha za period ekspluatatsii (1973–2018 gody)* [Changes in the morphometric characteristics of the Krasnodar reservoir over the period of operation (1973–2018)], *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «InterCarto. InterGIS»*; 25(2): 5–15. doi: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-5-15.

8. Laguta, A.A., Pogorelov, A.V. (2019), *Osobennosti del'toformirovaniya rek, vpadayushchikh v dolinnoe vodokhranilishche (na primere Krasnodarskogo vodokhranilishcha)* [Features of delta formation of rivers flowing into a valley reservoir (on the example of the Krasnodar reservoir)], *Geograficheskiy vestnik = Geographical bulletin*, no. 3(50), pp. 119–134. doi: 10/17072/2079-7877-2019-3-119-134.

9. Laguta, A.A., Pogorelov, A.V. (2019), Transformatsiya Krasnodarskogo vodokhranilishcha (1941–2018 gg.) [Transformation of the Krasnodar reservoir (1941–2018)], *Izvestiya vysshih uchebnykh uchrezhdeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki*, no. 3, pp. 45–54. doi: 10.23683/0321-3005-2019-3-45-54.
10. Laguta, A.A., Pogorelov, A.V. (2020), Analiz zaileniya i gidrodinamicheskikh protsessov v degradiruyushchem poymenno-dolinnom vodokhranilishche (na primere Krasnodarskogo vodokhranilishcha) [Analysis of siltation and hydrodynamic processes in a degrading floodplain-valley reservoir (on the example of the Krasnodar reservoir)], *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «InterCarto. InterGIS»*, 26(2): 335–348. doi: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-335-348.
11. Laguta, A.A., Pogorelov, A.V. (2021), Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' kontsentratsii khlorofilla «a» v Krasnodarskom vodokhranilishche po dannym sputnikovykh snimkov [Spatio-temporal variability of chlorophyll "a" concentration in the Krasnodar reservoir according to satellite images], *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, no. 4, pp. 67–84. doi: 10.35567/1999-4508-2021-4-4.
12. Litovka, F.S., Bandurin, M.A., Vanzha, V.V. (2019), Puti resheniya problemy zaileniya Krasnodarskogo vodokhranilishcha dlya ratsional'nogo ispol'zovaniya resursov poymennykh territoriy [Ways to solve the problem of silting of the Krasnodar reservoir for the rational use of resources of floodplain territories], *Elektronnyy nauchnyy zhurnal Inzhenernyy vestnik Dona*, no. 7.
13. Lur'e P.M., Panov V.D., Tkachenko Ju.Ju. (2005), Reka Kuban': gidrografiya i rezhim stoka [Kuban River: hydrography and flow regime], SPb.: Gidrometeoizdat.
14. Lur'e, P.M., Panov, V.D. (2021), Reki basseyna Azovskogo morya: gidrografiya i rezhim stoka. [Rivers of the Sea of Azov basin: hydrography and runoff regime], Rostov-on-Don. Donskoy izdatel'skiy dom.
15. Malysheva, N.N., Yakuba, S.N. (2017), Razvitie melioratsii na Kubani i ratsional'noe vodopol'zovanie pri oroshenii risa [Development of land reclamation in the Kuban and rational water use in rice irrigation], *Risovodstvo*, no. 4(37), pp. 47–56.
16. The official site of the Kuban Basin Water Administration of the Federal Agency for Water Resources, available at: <http://www.kbv-fgu.ru/> (Accessed 15 February 2022).
17. Pishchenko, D.A., Garkusha, S.V., Tesheva, S.A. (2020), Effektivnost' vyrashchivaniya risa v Krasnodarskom krae [The efficiency of rice cultivation in the Krasnodar Territory], *Maslichnye kultury*, no. 3(183), pp. 103–106.
18. Pogorelov, A.V., Lipilin, D.A., Kurnosova, A.S. (2017), Sputnikovyy monitoring Krasnodarskogo vodokhranilishcha [Satellite monitoring of the Krasnodar reservoir], *Geograficheskiy vestnik = Geographical bulletin*, no. 1(40), pp. 130–137.
19. Pogorelov, A.V., Laguta, A.A. (2020), O tsirkulyatsii vod v dolinnom vodokhranilishche (Krasnodarskoe vodokhranilishche) [About water circulation in the valley reservoir (Krasnodar reservoir)], *Izvestiya vysshih uchebnykh uchrezhdeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki*, no. 4, pp. 87–97. doi: 10.18522/1026-2237-2020-4-87-97.
20. Pravila ispol'zovaniya vodnykh resursov Krasnodarskogo vodokhranilishcha. [Rules for the use of water resources of the Krasnodar reservoir] (2008), PII "Kuban`vodproekt". Krasnodar, 158 p.
21. Rukovodstvo po topograficheskoy syomke shelfa i vnutrennikh vodoyomov (GKINP -11-157-88) [Topographical survey of the shelf and inland waters. Manual] (1989), Moscow: Central Scientific Research Institute of Geodesy, Aerial Photography and Cartography, 1989.
22. RD 52.08.767-2012. Raskhod vody na vodotokakh. Metodika izmereniy akusticheskimi doplerovskimi profilografami «Stream Pro» i «Rio Grande» [Guidance Document 52.08.767-2012. Water discharge in streams. The measurement procedure with the acoustic Doppler profilographs "Stream Pro" and "Rio Grande"], Federal State Institution «State Hydrological Institute», 2012.

Картография и геоинформатика
 Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселёв Е.Н.

23. Pogorelov Anatoly, Laguta Andrey, Kiselev Evgeny, Lipilin Dmitry. (2021), Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban river, Russia // *Journal of Geographical Sciences*, vol. 31, pp. 1895–1904. doi: 10.1007/s11442-021-1928-7.

Статья поступила в редакцию: 25.02.22; одобрена после рецензирования: 02.05.22; принята к опубликованию: 07.06.22.

The article was submitted: 25 February 2022; approved after review: 02 May 2022; accepted for publication: 07 June 2022.

Информация об авторах

Information about the authors

Анатолий Валерьевич Погорелов

доктор географических наук, профессор,
 Кубанский государственный университет;
 350040, Россия, Краснодар, ул. Ставропольская, 149

e-mail: pogorelov_av@bk.ru

Андрей Александрович Лагута

ведущий инженер ООО «АГМ Системы»;
 350063, Россия, Краснодар, ул. Фрунзе, 22

e-mail: alaguta@icloud.com

Евгений Николаевич Киселев

кандидат географических наук, доцент,
 Кубанский государственный университет;
 350040, Россия, Краснодар, ул. Ставропольская, 149

e-mail: enkiselev@gmail.com

Anatoly V. Pogorelov

Doctor of Geographical Sciences, Professor,
 Kuban State University;
 149, Stavropolskaya st., Krasnodar, 350040,
 Russia

Andrey A. Laguta

Lead Engineer, AGM Systems LLC;
 22, Frunze st., Krasnodar, 350063, Russia

Evgeny N. Kiselev

Candidate of Geographical Sciences, Associate
 Professor, Kuban State University;
 149, Stavropolskaya st., Krasnodar, 350040,
 Russia

Вклад авторов

Погорелов А.В. – идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, редактирование карт.

Лагута А.А. – обработка материала, работа с ГИС, создание карт.

Киселев Е.Н. – идея, сбор материала, научное редактирование текста

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Contribution of the authors

Anatoly V. Pogorelov – the idea; material processing; writing of the article; scientific editing of the text.

Andrey A. Laguta – collection and processing of the material; writing of the article.

Evgeny N. Kiselev – material processing.

The authors declare no conflict of interest.