Спутниковый мониторинг экологической катастрофы на Краснодарском водохранилище летом 2020 г. и её природные и антропогенные предпосылки

И. Е. Курбатова

Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия Email: irenkurb@yandex.ru

Проведён анализ особенностей формирования Краснодарского вдхр. с момента его полного заполнения в 1978 г. до 2020 г., выполненный при использовании разновременных картографических материалов и спутниковых изображений. Выделены основные причины долговременного катастрофического обмеления водохранилища и падения его уровня летом и осенью 2020 г. до значений, меньших уровня мёртвого объёма. Сложившаяся ситуация была спровоцирована как природными, так и антропогенными факторами. К постоянно действующим природным факторам деградации водохранилища относится многолетняя аккумуляция 95—98 % среднегодового стока наносов от основных притоков (около 6 млн м^3 /год), к эпизодическим — наступление засушливых лет с малым количеством осадков. К причинам антропогенного характера относятся конструктивные ошибки проектирования, заниженная оценка скорости заиления чаши водохранилища, снижение в 1993 г. нормального подпорного уровня на 0,9 м, несоразмерные с реальными условиями водозатраты на хозяйственные нужды и т.д. Сочетание этих факторов на фоне длительного маловодного периода обусловило снижение объёма воды в 2020 г. до 6-10 % полного объёма и осушение мелководий, что привело к тяжёлым экологическим последствиям. Анализ космической информации со спутника Sentinel-2, идентификация зеркала воды с помощью индекса MNDWI и определение площади водоёма показали, что его открытая водная поверхность сократилась на 58 % от проектной величины. Отмечено, что документальный характер космической информации и её регулярное использование позволяют своевременно фиксировать изменения состояния водохранилища, которые, безусловно, следует учитывать в водохозяйственной практике региона для принятия реалистических решений.

Ключевые слова: водохранилище, заиление, спутниковые изображения, речные наносы, экологическая катастрофа, снижение уровня, обмеление, MNDWI

Одобрена к печати: 18.10.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-328-334

Краснодарское вдхр. (КВ), созданное на р. Кубани в 1973-1978 гг. (поглотившее заполненное в 1941 г. Тщикское вдхр.), является самым крупным в Кавказском регионе. Согласно проектным данным, при нормальном подпорном уровне (НПУ) его площадь составляла 400 км^2 , объём — 2396 млн м^3 , средняя глубина — 6 м (Исследование..., 2017). Водохранилище должно было решить проблему катастрофических наводнений в нижнем течении Кубани, обеспечить орошение сельскохозяйственных земель, проведение рыбонерестовых попусков в низовьях Кубани, улучшить условия судоходства (Правила..., 2008).

Длительный маловодный период на юге России привёл к существенному дефициту водных ресурсов всех водохранилищ Южного федерального округа (Шинкаренко и др., 2021). Для КВ эта ситуация превратилась в экологическую катастрофу: на протяжении пяти месяцев, с августа по декабрь 2020 г., уровень воды находился ниже уровня мёртвого объёма (УМО) с отметкой 25,85 м абс., изредка превышая его на несколько сантиметров. По данным Кубанского бассейнового водного управления (БВУ), запас воды в водохранилище составлял в этот период 6–10 % его полного объёма (http://www.kbvu-fgu.ru, дата обращения к архивным данным: 01.06. 2021).

Для оценки площади сократившегося зеркала воды и размера осушившихся мелководий были привлечены космические снимки со спутника Sentinel-2 за сентябрь 2020 г. Необходимыми условиями отбора были: отображение в кадре всей площади водохранилища,

отсутствие облачности и соответствие даты съёмки положению УМО водохранилища. Этим требованиям соответствовала съёмка от 17 сентября 2020 г. ($puc.\ 1a$). Уровень воды в этот день был равен УМО, объём воды в чаше водохранилища составил 192 млн м³ — 6,9 % от полного объёма в 2794 млн м³ (по данным сайта Кубанского БВУ). Использование модифицированного нормализованного разностного водного индекса MNDWI (anea). Modification Normalized Difference Water Index) (Du et al., 2018) позволило выделить зеркало воды высыхающего водохранилища ($puc.\ 16$). Подсчёт площади участков открытой водной поверхности показал, что площадь нижней части КВ от перемычки до плотины составила 121,5 км², а площадь бывшего Тщикского вдхр. — 42,4 км² вместо 80 км². Соответственно, суммарная площадь зеркала воды на момент съёмки составила лишь 164 км² от 400 км² всего водохранилища на период его ввода в эксплуатацию (Исследование..., 2017). Таким образом, перемычка и обсохщие мелководья заняли 235 км² (или 58 %) от исходной площади водохранилища ($puc.\ 2$), что крайне негативно сказалось на экологии и хозяйстве региона.

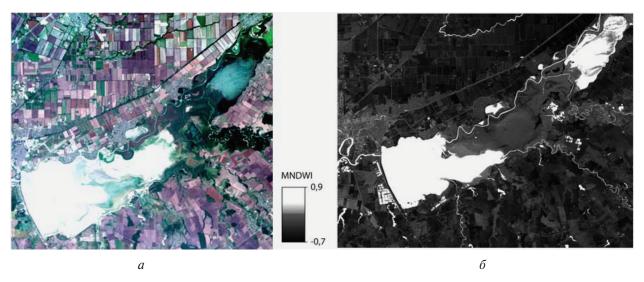


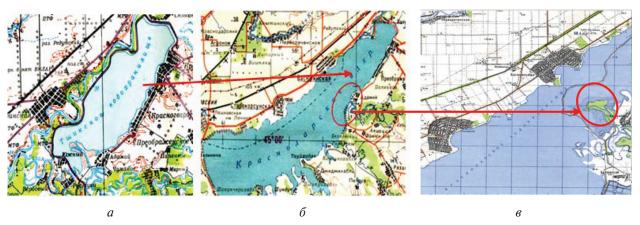
Рис. 1. Состояние водохранилища на 17 сентября 2020 г., спутник Sentinel-2: a — многозональное изображение; δ — изображение, преобразованное с помощью индекса MNDWI (белым цветом выделена открытая водная поверхность)



Puc. 2. Высохшее дно Краснодарского вдхр. летом 2020 г. (фотография с сайта «ЮгТіmes», https://yugtimes.com/news/61244/)

Причины глобального обмеления водохранилища определяются не только климатическими изменениями. Проблемы КВ начались уже в первые десять лет после заполнения, хотя в те годы никто не мог предсказать столь масштабное заиление водоёма (рис. 3, см. с. 330).

Известно, что заиление — закономерный естественный процесс, которому подвержены практически все искусственные водоёмы, при этом долговечность водохранилища зависит от скорости поступления наносов и их объёма (Беркович, 2012). Процесс заиления больших водохранилищ, как правило, длителен и может измеряться сотнями лет. Краснодарское же водохранилище оказалось разделено гигантской перемычкой из илистых отложений рек Кубани и Белой на два самостоятельных водоёма уже через 20 лет (рис. 4, 5, см. с. 331). Заиление сопровождается эвтрофикацией и зарастанием мелководий водоёма кустарником и древесной растительностью. Участки дна водоёма с абсолютными отметками выше 30,75 м абс. к 2016 г. заросли практически полностью (Лагута, Погорелов, 2018). Перемычка все годы вплоть до настоящего момента непрерывно увеличивается в размерах, что, как следствие, приводит к сокращению площади зеркала воды и уменьшению полезного объёма чаши водоёма.



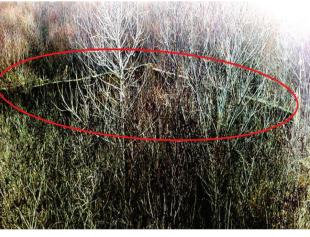
Puc.~3. Трансформация Краснодарского вдхр.: a — Тщикское вдхр. (топографическая карта 1947 г., масштаб 1:300 000); δ — общая водная поверхность Тщикского и Краснодарского водохранилищ, незначительное заиление в районе впадения р. Белой (топографическая карта 1978 г., масштаб 1:500 000); δ — начало роста выдвижной дельты р. Белой и формирование мелководий внутри дамбы бывшего Тщикского вдхр. (топографическая карта 1980 г., масштаб 1:100 000)



Рис. 4. Предпосылки будущего разделения Краснодарского вдхр. на два изолированных водоёма: а — топографическая карта масштаба 1:100 000, 1984 г.; б — космический снимок Landsat-5 1984 г. (архив Google Планета Земля (англ. Google Earth Pro)/Сорегпісиѕ (система Европейских центров морских прогнозов)). 1 — выдвижная дельта р. Белой, закреплённая древесной растительностью, и её основные протоки; 2 — русло р. Кубани при впадении в водохранилище между высоким правым берегом и дамбой Тщикского вдхр.; 3, 4 — соответственно сохранённые дамба и водосбросные устройства Тщикского вдхр.; 5 — зона осаждения твёрдых взвесей р. Кубани

Ёмкость водохранилища при современном НПУ, равном 32,75 м, за 1992—2016 гг. сократилась на 690 млн м³, средняя глубина уменьшилась на 1,6 м, площади мелководий выросли на 66 км² (Исследование..., 2017). Прирост объёма тела заиления (без отчленённого Тщикского водоёма) за 2005—2016 гг. составил 83,2 млн м³ (Лагута, Погорелов, 2018). Основные этапы трансформации КВ, выделенные по хронологически подобранным картографическим материалам и спутниковым изображениям, подробно рассмотрены в работах (Курбатова, 2014; Kurbatova, 2020).





б

Puc. 5. Зарастание водохранилища: a — перемычка, разделившая Тщикское и Краснодарское водохранилища на два изолированных водоёма (космический снимок Landsat-7 2019 г., архив Google Earth Pro/Copernicus); δ — сохранившаяся часть дамбы Тщикского вдхр. внутри перемычки, заросшей древесной растительностью (фотография с закрытого форума «К 70-летию Тщикского водохранилища» https://forum.motolodka.ru/read.php?f=3&i=56977&t=56977)

Использование спутниковой информации для многолетнего наблюдения за особенностями трансформации КВ позволило выявить предпосылки возникновения современных проблем водоёма, к которым относится комплекс факторов.

- 1. Ошибки проектирования Краснодарского вдхр.:
 - **включение в его акваторию Тщикского вдхр.**, самостоятельно существовавшего на протоке р. Белой в 1941 г. (см. *рис. 4a*), **при сохранении дамбы этого водохранилища**, которая в течение многих лет ограничивала свободный сток наносов Кубани и задерживала большую часть твёрдого стока Белой (см. *рис. 4*, объекты 3, 4);
 - запроектированное впадение р. Кубани почти напротив устья р. Белой, что привело к суммарному накоплению наносов обеих рек на одном участке (створе) водохранилища (см. рис. 46, объекты 1, 2 и 5);
 - недооценка скорости и объёма поступления наносов со стоком рек Кубани, Белой и других притоков, берущих начало в горных массивах Кавказа, в чашу КВ.
- 2. Принудительное снижение НПУ водохранилища на 0,9 м (с 33,65 до 32,75 м) по просьбе Республики Адыгея в 1993 г., что активизировало процесс обмеления и увеличения площади дельты р. Белой, зарастания её надводных участков. Это стало причиной постепенного отчленения Тщикского вдхр. от основного зеркала воды, создания перепада высот и окончательного исключения данного водоёма из акватории Краснодарского вдхр. (Доклад..., 2020).
- **3. Рост объёма водопотребления на сельскохозяйственные и производственные нужды.** На протяжении 10 лет Краснодарский край занимает первое место по общему забору воды из природных источников (6290 млн м³), опережая Ленинградскую, Тюменскую и Московскую области (Госдоклад..., 2019). Активный разбор вод Кубани и её прито-

ков на хозяйственные нужды вызывает периодическое обмеление рек. На долю промышленного производства приходится 30-35% объёма безвозвратного водопотребления, на орошаемое земледелие — более 40% (Никаноров и др., 2013). Рисоводство забирает основной объём: на заливку 1 га уходит 15-20 тыс. м³ воды (Золотов, 2021).

4. Непринятие своевременных мер по ликвидации перемычки на начальной стадии её развития вследствие недопонимания серьёзности проблемы заиления водохранилища и масштабности негативных последствий его разделения на два независимых водоёма. Начавшаяся реализация узких соединительных струенаправляющих прорезей в теле перемычки между р. Белой и современным руслом Кубани (Исследование.., 2017; Кигbatova, 2020) не решает проблемы выноса наносов за пределы перемычки и уменьшения её площади.

Архив космических снимков Краснодарского вдхр. представляет многолетнюю документальную летопись развития его экологической катастрофы, запечатлевшую основные этапы и специфические особенности деградации водоёма и позволившую выявить ключевые ошибки его создания и эксплуатации. Информационная составляющая современного космического мониторинга водохранилища может быть значительно расширена использованием многочисленных автоматизированных индексов для выделения границ и определения площадей водных поверхностей, территорий с переменным осушением, участков, зарастающих древесной растительностью и т.п. при разных положениях уровня водоёма. Сведения, полученные с помощью мониторинга, необходимо учитывать для принятия реалистических решений по рациональному использованию водных ресурсов водохранилища как при катастрофических обмелениях, так и при экстремальных повышениях его уровня.

Работа выполнена в рамках государственного задания AAAA-A19-119040990079-3 № 0147-2019-0004 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

- 1. *Беркович К. М.* Русловые процессы на реках в сфере влияния водохранилищ. М.: Геогр. фак. МГУ, 2012. 163 с.
- 2. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». М.: НИА-Природа, 2019. 290 с.
- 3. Доклад о состоянии природопользования и об охране окружающей среды Краснодарского края в 2019 году / М-во природных ресурсов Краснодарского края. Краснодар, 2020. 549 с. URL: https://mprkk.ru/media/main/attachment/attach/doklad_oos_za_2019_.pdf.
- 4. *Золотов Б.* Кубанское море: мало воды и много проблем // Кубанские новости. 2021. 4 февр. URL: https://kubnews.ru/obshchestvo/2021/02/04/kubanskoe-more-malo-vody-i-mnogo-problem/.
- 5. Исследование влияния режима регулирования Краснодарского водохранилища при сниженной отметке НПУ (32,75 м) на эксплуатационные и экологические характеристики водохранилища. Разработка научно-обоснованных рекомендаций и мероприятий по улучшению этих характеристик: отчет по НИР. Т. 4. Краснодар: ПИИ «Кубаньводпроект», 2017. 142 с.
- 6. *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.
- 7. *Лагута А.А.*, *Погорелов А.В.* Особенности заиления Краснодарского водохранилища. Опыт оценки по данным батиметрических съемок // Геогр. вестн. 2018. № 4(47). С. 54–66. DOI 10.17072/2079-7877-2018-4-54-66.
- 8. *Никаноров А. М.*, *Брызгало В. А.*, *Решетняк О. С.*, *Косменко Л. С.*, *Кондакова М. Ю.* Антропогенная трансформация экологического состояния и транспорт загрязняющих веществ по длине реки Кубани // Водное хозяйство России. 2013. № 2. С. 109—118.
- 9. Правила использования водных ресурсов Краснодарского водохранилища. Краснодар: ПИИ «Кубаньводпроект». 2008. 158 с.
- 10. Шинкаренко С. С., Солодовников Д. А.,. Барталев С. А. Гидрологическая ситуация на водохранилищах юга европейской части России в $2020 \, \text{г.}$ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 248—254. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254.

- 11. Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 4. P. 354–372. https://doi.org/10.3390/rs8040354.
- 12. *Kurbatova I. E.* Geo-ecological Monitoring Main Water Bodies of the Republic of Adygea Using Remote Sensing Data // The Handbook of Environmental Chemistry. Berlin; Heidelberg: Springer, 2020. Ch. 13. P. 461–495. https://doi.org/10.1007/698_2020_641.

Satellite monitoring of the ecological disaster at the Krasnodar Reservoir in the summer of 2020 and its natural and anthropogenic prerequisites

I. E. Kurbatova

Water Problems Institute RAS, Moscow 119333, Russia Email: irenkurb@vandex.ru

The analysis of the features of the Krasnodar Reservoir formation from the moment of its full filling in 1978 to 2020 was carried out using multi-temporal cartographic materials and satellite images. The main reasons of long-term catastrophic shallowing of the reservoir and the drop in its level to values less than the dead volume level (DVL) in the summer and autumn of 2020 were highlighted. The current situation was provoked by both natural and anthropogenic factors. The permanent natural factors of reservoir degradation include long-term accumulation of $95-98\,\%$ of the average annual sediment runoff from the main tributaries (about 6 million m³/year), episodic one is the coming of dry years with low precipitation. Anthropogenic reasons include constructive design errors, underestimation of the reservoir bowl siltation rate, decrease in the normal retaining level by 0.9 m in 1993, water consumption for household needs disproportionate to real conditions, etc. The combination of these factors against the background of a long dry period made conditional upon decrease in the volume of water in 2020 to 6-10 % of the total reservoir volume and drainage of shallow waters, which led to severe environmental consequences. Analysis of space information from the Sentinel-2 satellite, identification of the water mirror using the MNDWI index and determination of the reservoir area showed that its open water surface decreased by 58 % of the design value. It is noted that the documentary character of space information and its regular use make it possible timely recording changes of the reservoir condition, which should certainly be taken into account in the water management practice of the region for making realistic decisions.

Keywords: reservoir, siltation, satellite images, river sediments, ecological disaster, level decline, shallowing, MNDWI

Accepted: 18.10.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-328-334

References

- 1. Berkovich K. M., *Ruslovye protsessy na rekakh v sfere vliyaniya vodokhranilishch* (Channel processes on rivers in the sphere of reservoir impact), Moscow: Geograficheskii fakul'tet MGU, 2012, 163 p. (in Russian).
- 2. State Report "On the condition and using water resources of the Russian Federation in 2018", Moscow: NIA-Priroda, 2019, 290 p. (in Russian).
- 3. Report on the condition of nature management and environmental protection of the Krasnodar Territory in 2019, Ministry of Natural Resources of the Krasnodar Territory, Krasnodar, 2020, 549 p. (in Russian), available: https://mprkk.ru/media/main/attachment/attach/doklad_oos_za_2019_.pdf.
- 4. Zolotov B., Kuban Sea: little water and many problems, *Kubanskie Novosti*, 2021, 4 Fevr. (in Russian), available at: https://kubnews.ru/obshchestvo/2021/02/04/kubanskoe-more-malo-vody-i-mnogo-problem/.
- 5. Investigation of the influence of the Krasnodar reservoir regulation regime at lowered normal retaining level mark (32.75 m) on the operational and environmental reservoir characteristics. Development of scientifically based

- recommendations and actions to improve these characteristics, Vol. 4, Krasnodar: PII "Kuban'vodproekt", 2017, 142 p. (in Russian).
- 6. Kurbatova I. E., Monitoring the transformation of Krasnodar Reservoir utilizing high resolution satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 42–53 (in Russian).
- 7. Laguta A.A., Pogorelov A.V., Peculiarities of Krasnodar water reservoir silting. Evaluation experience from bathymetric survey data, *Geograficheskii vestnik*, 2018, No. 4(47), pp. 54–66 (in Russian), DOI: 10.17072/2079-7877-2018-4-54-66.
- 8. Nikanorov A. M., Bryzgalo V. A., Reshetnyak O. S., Kosmenko L. S., Kondakova M. Yu., Anthropgenic transformation of ecological status and pollutants' transport along the Kuban River length, *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2013, No. 2, pp. 109–118 (in Russian).
- 9. *Pravila ispol'zovaniya vodnykh resursov Krasnodarskogo vodokhranilishcha* (Rules to use water resources of the Krasnodar Reservoir), Krasnodar: PII "Kuban'vodproekt", 2008, 158 p. (in Russian).
- 10. Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Bartalev S. A., Hydrological situation in the reservoirs of the south part of the European Russia in 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 248–254 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254.
- 11. Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X., Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 4, pp. 354–372, https://doi.org/10.3390/rs8040354.
- 12. Kurbatova I. E., Geo-ecological Monitoring Main Water Bodies of the Republic of Adygea Using Remote Sensing Data In: *The Handbook of Environmental Chemistry*, Berlin; Heidelberg: Springer, 2020, Chapter 13, pp. 461–495, https://doi.org/10.1007/698_2020_641.