

Последствия повреждения плотины Каховской ГЭС на реке Днепр

С. С. Шинкаренко, С. А. Барталев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

В ночь с 5 на 6 июня 2023 г. произошло повреждение плотины Каховской ГЭС — самой нижней по течению Днепра, что вызвало подъём воды ниже по течению и падение уровня воды в Каховском вдхр. Использование спутниковых данных высокого пространственного разрешения Landsat-8, -9 на 1–18 июня 2023 г. позволило определить зоны затопления и масштабы осушения дна водохранилища. В результате повышения уровня в нижнем бьефе Каховского вдхр. более чем на 5 м произошло затопление и подтопление на общей площади не менее 36 тыс. га, из которых около 2 тыс. га относятся к землям населённых пунктов и 670 га — к застройке и хозяйственным объектам. Населённые пункты Белогрудово, Алёшки, Голая Пристань и г. Херсон пострадали наиболее сильно. Последствия повреждения плотины привели к уменьшению площади Каховского вдхр. почти вдвое: с 209,1 до 109,9 тыс. га. Использование технологий спутникового мониторинга позволит оценить дальнейшие изменения обсыхающего дна водохранилища и последствия наводнения ниже плотины Каховской ГЭС.

Ключевые слова: Днепр, Каховское водохранилище, затопление, гидрология, дистанционное зондирование, Запорожская область, Херсонская область

Одобрена к печати: 27.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-314-322

Каховское вдхр. — самое нижнее по течению из всего каскада днепровских водохранилищ, введено в эксплуатацию в 1956 г. Расположено в Запорожской и Херсонской областях. При нормальном подпорном уровне (НПУ) 16 м площадь водоёма составляет около 215 тыс. га (протяжённость — 230 км, ширина — до 25–30 км), а объём превышает 18 км³. Уровень мёртвого объёма (УМО, полной сработки водохранилища) имеет отметку 12,7 м. Из Каховского вдхр. осуществляется подача воды в ряд каналов: Северо-Крымский, Каховский и Днепр—Кривой Рог. Водоём имеет высокую водохозяйственную и гидроэнергетическую ценность, а также играет большую роль в воспроизводстве рыбных ресурсов (Khilchevskiy et al., 2022).

Повреждение плотины Каховской гидроэлектростанции (ГЭС) произошло в ночь с 5 на 6 июня 2023 г., что привело к резкому подъёму уровня воды в её нижнем бьефе и падению уровня в Каховском вдхр. выше плотины, что ставит под угрозу не только соответствие водоёма проектным характеристикам, но и его дальнейшее существование. Донные отложения водохранилища содержат высокую концентрацию различных загрязняющих веществ, в том числе тяжёлых металлов и радиоактивных элементов, поэтому обнажение дна водоёма и его высыхание могут привести к их переносу (Федоненко и др., 2010; Linnik, Zubenko, 2000). Одной из экологических проблем Каховского вдхр. также представляется высокая степень эвтрофикации, которая приводит к бурному размножению сине-зелёных водорослей в условиях летнего нагрева практически стоячей воды (Belenok et al., 2017). Таким образом, попадание большого количества пресной днепровской воды с высоким содержанием органики в Днепро-Бугский лиман и далее в Чёрное море может привести к серьёзным экологическим последствиям.

Данные дистанционного зондирования Земли из космоса достаточно широко применяются для оценки последствий различных чрезвычайных ситуаций, связанных с повреждениями гидротехнических сооружений (Константинова, Лупян, 2020; Терехов и др., 2020),

засухами, которые приводят к падению уровней воды в водохранилищах (Курбатова, 2021; Шинкаренко и др., 2021а, б), или наводнениями (Воронова и др., 2020; Дубина и др., 2018).

Водное зеркало в данной работе картографировалось на основе индекса NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index — нормализованный разностный водный индекс), рассчитываемого как нормализованная разница яркости в зелёном и ближнем инфракрасном диапазонах (McFeeters, 1996). К водной поверхности относились пиксели с положительными значениями NDWI. Спутниковые данные Landsat-8, -9 второго уровня обработки, прошедшие процедуру коррекции атмосферных искажений, загружены с помощью сервиса «Вега-Science» (Loupian et al., 2022). Анализировались данные за период с 1 по 18 июня 2023 г., что позволяет провести сравнение гидрологической ситуации до и после повреждения плотины Каховской ГЭС. Выбор источников данных обусловлен достаточно высоким пространственным разрешением (30 м/пиксель), что важно для точного картографирования водного зеркала, особенно в условиях городской застройки. Также использованы данные о типах земного покрова ESA (*англ.* European Space Agency) WorldCover на 2021 г. пространственного разрешения 10 м (*рис. 1*), в основе которых лежат спутниковые изображения Sentinel-1, -2 (Zanaga et al., 2021).

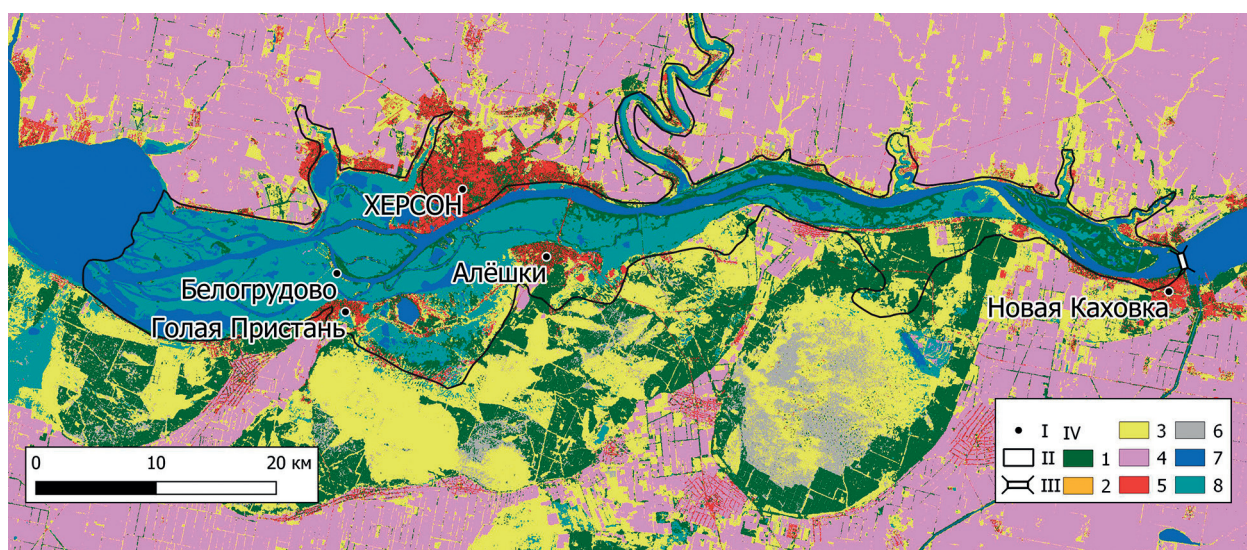
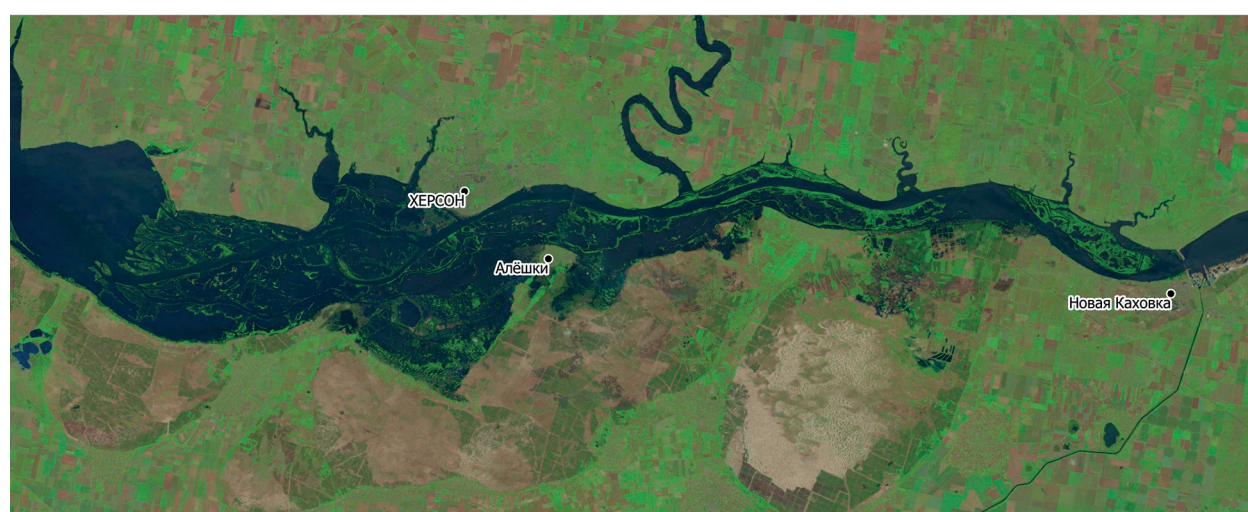


Рис. 1. Типы земного покрова в нижнем течении Днепра: I — населённые пункты; II — примерные границы поймы Днепра; III — плотина Каховской ГЭС; IV — типы земного покрова ESA: 1 — лес, 2 — кустарники, 3 — травянистые экосистемы, 4 — пашни, 5 — искусственные поверхности, 6 — открытые почвы, 7 — постоянные водоёмы, 8 — водно-болотные угодья

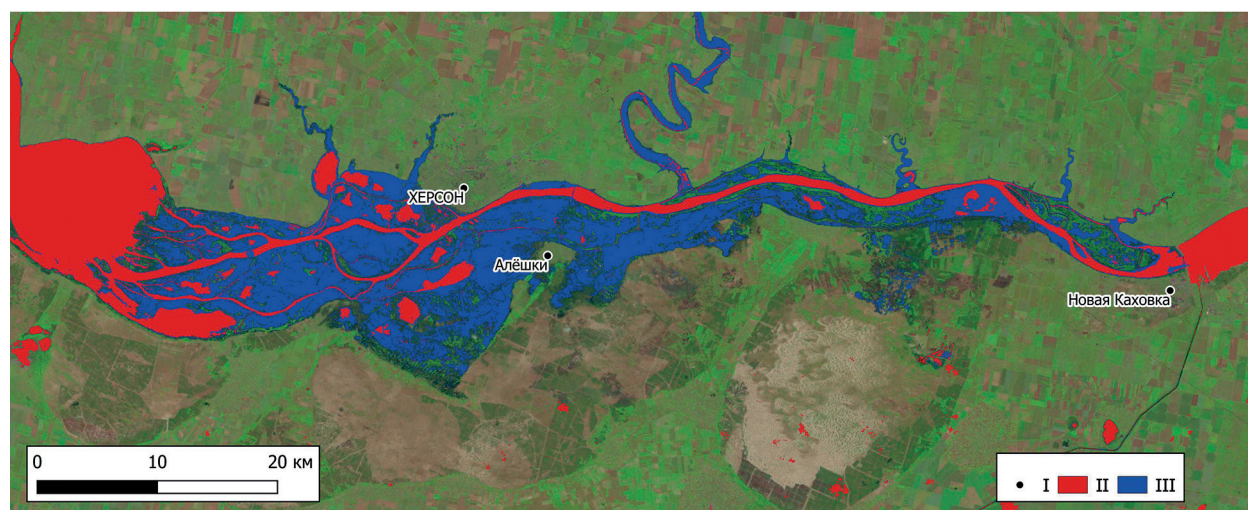
На *рис. 2* (см. с. 316) показано изменение площади водного зеркала Днепра ниже плотины Каховской ГЭС. По данным сервиса Theia (<https://hydroweb.theia-land.fr>), уровень воды в нижнем бьефе плотины Каховской ГЭС вырос к 11.06.2023 до отметки 6,8 м, тогда как отметка до повреждения плотины составляла 1,6 м (на 02.06.2023). Уровень воды поднялся не только непосредственно в пойме Днепра, но также и в его правом притоке — р. Ингулец. Это может быть связано как с подъёмом днепровской воды вверх по течению этой реки, так и с подпором со стороны Днепра. По данным информационного продукта мониторинга половодий MCDWD, основанного на спутниковых изображениях MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (https://nrt3.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MCDWD_L3_NRT), максимальная площадь водного зеркала в низовьях Днепра зафиксирована 09.06.2023, на эту же дату использовано изображение Landsat-9 (см. *рис. 2б, в*). На 01.06.2023 площадь водного зеркала составила 13,6 тыс. га, на 09.06.2023 она увеличилась на 35,8 тыс. га, достигнув величины почти 50 тыс. га.



а



б



в

Рис. 2. Спутниковые изображения Днепра ниже плотины Каховской ГЭС: *а* — до повреждения (01.06.2023); *б* — после повреждения (09.06.2023); *в* — схема изменения водного зеркала: I — населённые пункты, II — 01.06.2023, III — 09.06.2023

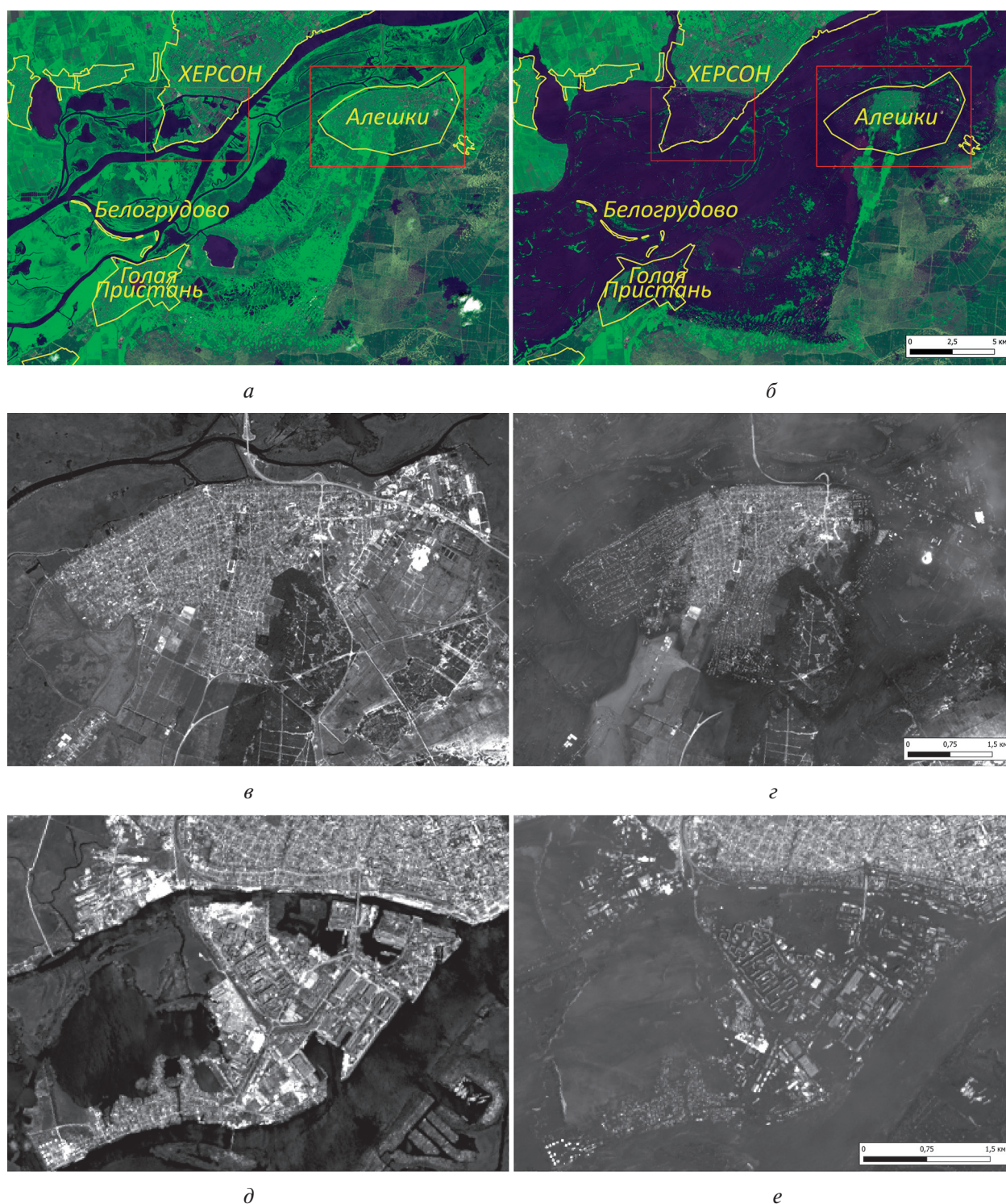


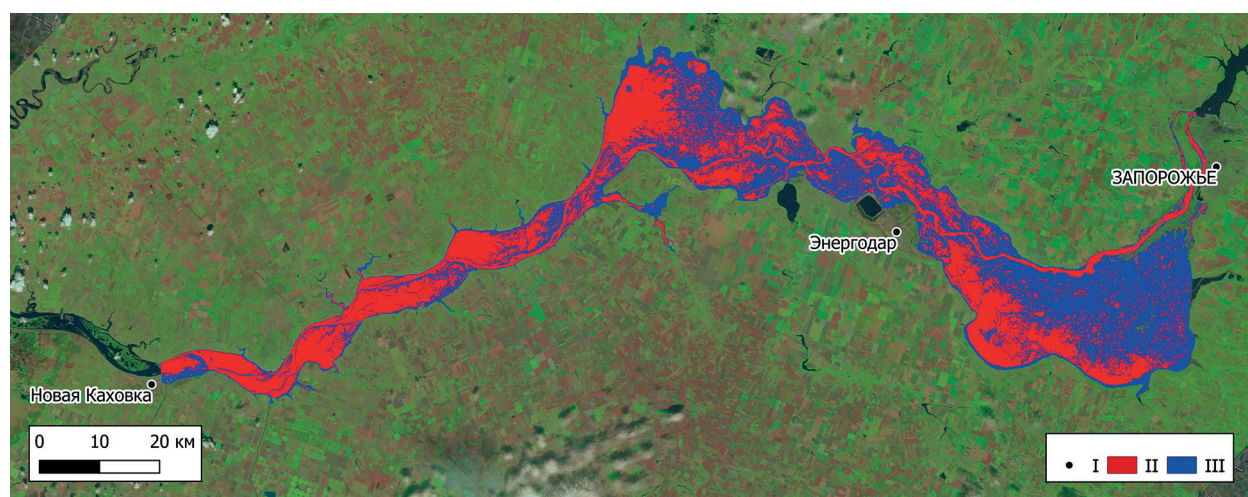
Рис. 3. Спутниковые изображения Landsat в районе Херсона: а — 01.06.2023, б — 09.06.2023; увеличенные фрагменты панхроматического изображения на эти же даты: в, г — Алёшки, д, е — южная часть Херсона; красный контур — положение фрагментов в–е, жёлтый контур — границы населённых пунктов



a



б



в

Рис. 4. Спутниковые изображения Каховского вдхр.: *a* — до повреждения плотины Каховской ГЭС (02.06.2023); *б* — после повреждения (18.06.2023); *в* — схема изменения водного зеркала: I — населённые пункты, II — 18.06.2023, III — 02.06.2023

Согласно карте типов земного покрова ESA WorldCover, затопленными и подтопленными на 09.06.2023 оказались примерно 670 га искусственных поверхностей, к которым могут быть отнесены здания, дороги, теплицы и другие объекты застройки. Почти 350 га из них расположены в г. Херсон и населённом пункте Алёшки. Также затопленными оказались около 390 га пахотных земель, 800 га лесов, 4,5 тыс. га лугов и 26 тыс. га водно-болотных угодий. Сопоставление границ населённых пунктов по данным Open Street Map (<https://www.openstreetmap.org/>) с маской водного зеркала на 09.06.2023 позволило выделить 24 затронутых наводнением населённых пункта, около 11 % площади которых оказались затопленными (примерно 2 тыс. га). Наиболее пострадали населённые пункты Голая Пристань, Алёшки и Белогрудово, площадь затопления в которых составила от 25 до 61 %. Также было затоплено около 9 % площади г. Херсона. Лес, здания и высокостебельная растительность водно-болотных угодий зачастую не полностью покрываются водой, из-за чего маскируют водное зеркало. По этой причине площадь затопленных и подтопленных зданий и лесов может быть значительно больше, что подтверждается *рис. 3* (см. с. 317).

Уровень Каховского вдхр., по данным сервиса Theia, упал с 17,2 м на 04.06.2023 до 11,9 м на 09.06.2023, что значительно ниже УМО, в результате чего обнажилось дно водоёма (*рис. 4*, см. с. 318). Площадь водоёма от г. Запорожье до плотины Каховской ГЭС на 02.06.2023, по данным Landsat, составила 209,1 тыс. га, на 18.06.2023 водоём уменьшился практически вдвое, до 109,9 тыс. га. Осушение дна водохранилища на такой значительной площади — исключительная ситуация, последствия которой ещё предстоит оценить. Подобное относительное уменьшение площади водного зеркала водохранилищ отмечалось только в 2018–2020 гг., когда в Крыму из-за засухи и прекращения поступления днепровской воды через Северо-Крымский канал площадь отдельных водоёмов уменьшилась в десять и более раз (Шинкаренко и др., 2021б). Самое крупное водохранилище Крыма — Фронтное — имеет проектную площадь всего 645 га, поэтому масштабы осушения дна несопоставимы с Каховским вдхр. В 2020 г. площадь Цимлянского вдхр. на р. Дон сократилась почти на 70 тыс. га, или четверть от проектной, но отметки УМО всё же не были достигнуты (Шинкаренко и др., 2021а).

Данные дистанционного зондирования Земли могут применяться не только для оценки изменения площади водоёмов, но и для мониторинга состояния осушек (Шевурдяев, Клященко, 2019) и переходных экосистем «вода — суша» (Кутозов, 2011), а также сукцессионных изменений на высохшем дне. Это открывает уникальные возможности дальнейшей оценки последствий падения уровня воды и высыхания дна Каховского вдхр., что становится очень важной задачей, поскольку в нашей стране подобные равнинные водохранилища занимают значительные площади.

В результате повреждения плотины Каховской ГЭС площадь затопления и подтопления в нижнем бьефе составила не менее 36 тыс. га, в том числе около 2 тыс. га земель населённых пунктов и 670 га застройки и хозяйственных объектов. Наиболее сильно затронуты населённые пункты Белогрудово, Алёшки, Голая Пристань и г. Херсон. На спутниковых изображениях Днепра по данным Landsat ниже плотины Каховской ГЭС 17–18 июня 2023 г. площадь затопления снизилась вследствие падения уровня воды, более точная оценка затруднена из-за облачности. Площадь Каховского вдхр. на 20.06.2023 уменьшилась почти в два раза — с 209,1 до 109,9 тыс. га.

Работа выполнена в рамках темы Института космических исследований РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8) с использованием сервиса «Bega-Science» (Loupian et al., 2022) и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Литература

1. Воронова А. Е., Рублев И. В., Соловьева И. А., Панов Д. Ю., Гордеева О. С., Батанов Д. В., Завьялова Д. Ю., Косторная А. А. Спутниковый мониторинг экстремального наводнения в Иркутской области 2019 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 263–266. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-1-263-266>.
2. Дубина В. А., Шапов В. В., Плотников В. В. Катастрофическое наводнение в Приморье в августе 2018 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 253–256. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-253-256>.
3. Константинова А. М., Лупян Е. А. Анализ последствий прорыва дамбы Сардобинского водохранилища 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 261–266. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-261-266.
4. Курбатова И. Е. Спутниковый мониторинг экологической катастрофы на Краснодарском водохранилище летом 2020 г. и её природные и антропогенные предпосылки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 328–334. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-328-334>.
5. Курузов А. В. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга систем «вода — суша» на равнинных водохранилищах (на примере Цимлянского водохранилища) // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 64–72.
6. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2015t5/263%E2%80%9393284.pdf.
7. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Лагутин Е. И. Спутниковый мониторинг Сардобинского водохранилища в бассейне реки Сырдарьи (Узбекистан) до и после прорыва дамбы 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 255–260. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-255-260>.
8. Федоненко О. В., Есінова Н. Б., Шарамок Т. С., Маренков О. М. Гідроекологічний стан Каховського водосховища // Питання біоіндикації та екології. 2010. Т. 15. № 2. С. 214–222.
9. Швердяев И. В., Клещенко А. В. Дешифрирование осушек Цимлянского водохранилища при колебаниях уровня // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Геоинформац. технологии и косм. мониторинг. 2019. № 4. С. 98–100. <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2019-2-4-98-100>.
10. Шинкаренко С. С., Солодовников Д. А., Барталев С. А. (2021a) Гидрологическая ситуация на водохранилищах юга европейской части России в 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 248–254. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254>.
11. Шинкаренко С. С., Солодовников Д. А., Барталев С. А., Васильченко А. А., Вытрицкий А. А. (2021b) Динамика площадей водохранилищ полуострова Крым // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 226–241. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241>.
12. Belenok V., Derkach D. I., Rul N. V. Use of aerospace methods and image processing methods of remote sensing of the Earth for environmental monitoring of Kakhovka Reservoir // Astronomical School's Report. 2017. V. 13. No. 1. P. 54–63. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.13.09>.
13. Khilchevskyi V., Grebin V., Dubniak S., Zabokytska M., Bolbot H. Large and small reservoirs of Ukraine // J. Water and Land Development. 2022. No. 52. P. 101–107. DOI: 10.24425/jwld.2022.140379.
14. Linnik P. M., Zubenko I. B. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds // Lakes and Reservoirs: Research and Management. 2000. V. 5. P. 11–21. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1770.2000.00094.x>.
15. Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Art. No. 77. <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
16. Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W., Souverijns N., Brockmann C., Quast R., Wevers J., Grosu A., Paccini A., Vergnaud S., Cartus O., Santoro M., Fritz S., Georgieva I., Lesiv M., Carter S., Herold M., Li L., Tsensdbazar N. E., Ramoino F., Arino O. ESA WorldCover 10 m 2020 v100. 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>.

The consequences of damage to the Kakhovka Reservoir dam on the Dnieper River

S. S. Shinkarenko, S. A. Bartalev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

On the night of 5 to 6 June 2023, the dam of the Kakhovka Hydroelectric Power Station — the lowest along the Dnieper River — was damaged, causing an increase in water levels downstream and a decrease in water levels in the Kakhovka Reservoir. The use of high spatial resolution satellite data from Landsat-8, -9 enabled the identification of flooding zones and the scale of the Reservoir bed drying up. As a result of the water level rise of more than 5 meters in the lower bay of the Kakhovka Reservoir, flooding and inundation occurred on a total area of at least 36 thousand hectares, of which about 2 thousand hectares belong to settlement areas and 670 hectares — to buildings and infrastructure. The settlement areas of Belogradovo, Alyoshkino, Golya Pristan, and the city of Kherson were most affected. The consequences of the dam destruction led to a reduction in the area of the Kakhovka Reservoir by almost half — from 209.1 to 109.9 thousand hectares.

Keywords: Dnieper, Kakhovka Reservoir, flooding, hydrology, remote sensing, Zaporozhye Region, Kherson Region

Accepted: 27.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-314-322

References

1. Voronova A. E., Rublev I. V., Solov'eva I. A., Panov D. Yu., Gordeeva O. S., Batanov D. V., Zav'yalo-va D. Yu., Kostornaya A. A., Satellite observation of extreme flooding in the Irkutsk Region in 2019, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 263–266 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-1-263-266>.
2. Dubina V. A., Shamov V. V., Plotnikov V. V., Disastrous flood in August 2018 in Primorye (south Pacific Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 253–256 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-253-256>.
3. Konstantinova A. M., Loupian E. A., Analysis of the consequences of the dam failure of the Sardoba Reservoir on May 1, 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 261–266 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-261-266>.
4. Kurbatova I. E., Satellite monitoring of the ecological disaster at the Krasnodar Reservoir in the summer of 2020 and its natural and anthropogenic prerequisites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 328–334 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-328-334>.
5. Kutuzov A. V., Monitoring of the Large Flat Water Reservoirs Using Remote Sensing Data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 6, pp. 64–72 (in Russian).
6. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
7. Terekhov A. G., Abaev N. N., Lagutin E. I., Satellite monitoring of the Sardoba Reservoir in Syr Darya River basin (Uzbekistan) before and after a dam collapses on May 1, 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 255–260 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-255-260>.
8. Fedonenko E. V., Esipova N. B., Sharamok T. S., Marenkov O. N., Hydroecological condition of Kakhovka Reservoir, *Pytannya bioindikatsii ta ekologii*, 2010, Vol. 15, No. 2, pp. 214–222 (in Ukrainian).
9. Sheverdyayev I. V., Kleshchenkov A. V., Decoding dewatering areas of the Tsimlyansk reservoir by water level fluctuation, *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Ser.: Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring*, 2019, No. 4, pp. 98–100 (in Russian), <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2019-2-4-98-100>.
10. Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Bartalev S. A. (2021a), Hydrological situation in the reservoirs in the south of the European part of Russia in 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo*

- zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 248–254 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254>.
11. Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Bartalev S. A., Vasil'chenko A. A., Vypritskii A. A. (2021b), Dynamics of the reservoirs areas of the Crimean Peninsula, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 226–241 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241>.
 12. Belenok V., Derkach D. I., Rul N. V., Use of aerospace methods and image processing methods of remote sensing of the Earth for environmental monitoring of Kakhovka Reservoir, *Astronomical School's Report*, 2017, Vol. 13, No. 1, pp. 54–63, <https://doi.org/10.18372/2411-6602.13.09>.
 13. Khilchevskiy V., Grebin V., Dubniak S., Zabokytska M., Bolbot H., Large and small reservoirs of Ukraine, *J. Water and Land Development*, 2022, No. 52, pp. 101–107, <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.1403792>.
 14. Linnik P. M., Zubenko I. B., Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds, *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2000, Vol. 5, pp. 11–21, <https://doi.org/10.1046/j.1440-1770.2000.00094.x>.
 15. Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Art. No. 77, <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
 16. Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W., Souverijns N., Brockmann C., Quast R., Wevers J., Grosu A., Paccini A., Vergnaud S., Cartus O., Santoro M., Fritz S., Georgieva I., Lesiv M., Carter S., Herold M., Li L., Tsendbazar N. E., Ramoino F., Arino O., *ESA WorldCover 10 m 2020 v100*, 2021, <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>.