

Многоспектральные спутниковые данные для мониторинга процессов после разрушения плотины Каховского водохранилища 6 июня 2023 года

С. В. Станичный, Р. Р. Станичная, А. А. Кубряков

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mails: sstanichny@mail.ru, rrsta@mail.ru

Спутниковые данные высокого пространственного разрешения показывают эффективность при мониторинге антропогенных и природных катастроф и исследовании их влияния на окружающую среду. В данной работе рассматривается ситуация, возникшая в нижнем русле Днепра, Каховском вдхр. и Северо-Западном шельфе Чёрного моря после разрушения украинскими вооружёнными силами плотины Каховской ГЭС. На основе регулярного мониторинга ситуации в районе бедствия с использованием спутниковых данных оптического диапазона — MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2, OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat — и радара SAR-C (*англ.* Synthetic Aperture Radar (C-band)) Sentinel-1 получены данные о развитии затопления районов ниже плотины и осушения водохранилища. Дополнительно использованы данные о батиметрии водохранилища и карты рельефа местности. Рассмотрено распространение загрязнённых вод на северо-западном шельфе с использованием данных сканеров MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и модели FOTS. Отмечено развитие цианобактерий в зоне загрязнения. В работе представлены результаты, полученные в течение двух недель после взрыва плотины.

Ключевые слова: многоспектральные методы, Каховское водохранилище, антропогенная катастрофа, загрязнение, наводнение

Одобрена к печати: 24.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-307-313

В ночь на 6 июня 2023 г. украинскими войсками была разрушена плотина Каховского вдхр., и неконтролируемое количество воды с высоты 14–15 м двинулось вниз по долине р. Днепр, затапливая территории и населённые пункты. Одновременно началось осушение Каховского вдхр. Каховское вдхр. — последнее в днепровском каскаде — имело площадь 2155 км² и напорную высоту около 14 м. Регулировка уровня воды осуществлялась системой заслонок, частично повреждённой в результате обстрелов ещё год назад. Разрушение плотины привело к экологической катастрофе и экстремальным явлениям в окружающей среде. Можно выделить три спровоцированных процесса:

- затопление поймы Днепра;
- осушение Каховского вдхр.;
- загрязнение вод Днепро-Бугского лимана и Северо-западного шельфа Чёрного моря.

Современные спутниковые данные, находящиеся в свободном доступе, позволяют оперативно получать информацию о состоянии экосистем и проводить оценку последствий катастрофических процессов антропогенного или природного характера (Лаврова и др., 2009, 2010; Медведева и др., 2021). Информация о батиметрии и топографии суши позволяет делать оценки падения уровня воды и подверженных затоплению участков суши. Для мониторинга изменений в окружающей среде использовались спутниковые данные оптического диапазона сканеров MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2, OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8, -9 и радиолокационные данные SAR-C (*англ.* Synthetic Aperture Radar (C-band)) — радар с синтезированной апертурой) спутника Sentinel-1. Дополнительно для оценки распространения загрязнений на акватории Северо-Западного шельфа были использованы данные сканеров MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Карты батиметрии Navionics Platinum (<https://www.navionics.com/fin/charts?format=Regular&charts=PlatinumPlu>)

s&fn1/) привлекались для оценки падения уровня. Оценка уровня подъёма воды проведена с применением топокарт (<https://ru-ru.topographic-map.com/>). Проанализированы данные за первые две недели после взрыва плотины.

Разрушение плотины и падение уровня водохранилища

На *рис. 1* представлены карты участка водохранилища перед плотиной с акваторией порта Новая Каховка и зоной забора воды в Северо-Крымский канал. Верхний фрагмент — снимок MSI Sentinel за 5 июня 2023 г., нижний — за 18 июня 2023 г. На снимке за 18 июня хорошо видна светлая область осушки (бывшее дно), граница зоны приблизительно соответствует положению изобаты 10 м из карты батиметрии Navionics. На этом же снимке наблюдаются разрушения плотины по сравнению с предыдущим снимком. Красной стрелкой на снимке за 5 июня показан водозабор Северо-Крымского канала. На 18 июня даже канал к водозабору не соединяется с водами остатков водохранилища. Таким образом, вода в канал не может поступать и возникли большие проблемы с водоснабжением Крыма в будущем.



а



б

Рис. 1. RGB-снимки района плотины, порта Новая Каховка и водозабора Северо-Крымского канала, сканер MSI за 5 июня (*а*) и 18 июня (*б*)

Оценка расхода воды через прорыв плотины может быть сделана на основе анализа последовательных изображений. Для этих целей была использована пара изображений локатора SAR-C, полученных 8 июня (15:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время)) и 9 июня (04:30 UTC), на которых хорошо выделялась зона осушки дна в восточной части водохранилища. Сравнение с батиметрическими картами показало, что границы этих зон приблизительно соответствуют изобатам 0,5 и 2 м соответственно. Таким образом, за 13,5 ч уровень упал на 1,5 м. Зная площадь водохранилища (2155 км²), можно оценить объём ушедшей воды и, разделив его на интервал времени, получить средний расход, который составил ~60 000 м³/с. Эта величина больше чем в 35 раз превышает средний расход в устье Днепра (1670 м³/с) и в 8 раз больше расхода в устье Дуная (6700 м³/с).

На *рис. 2* показана восточная часть водохранилища по состоянию на 18 июня. Большая часть водохранилища осушена, хорошо выделяется старое русло реки, а образовавшееся в южной части озеро находится на уровне выше русла Днепра и, по всей видимости, в ближайшее время будет осушено.

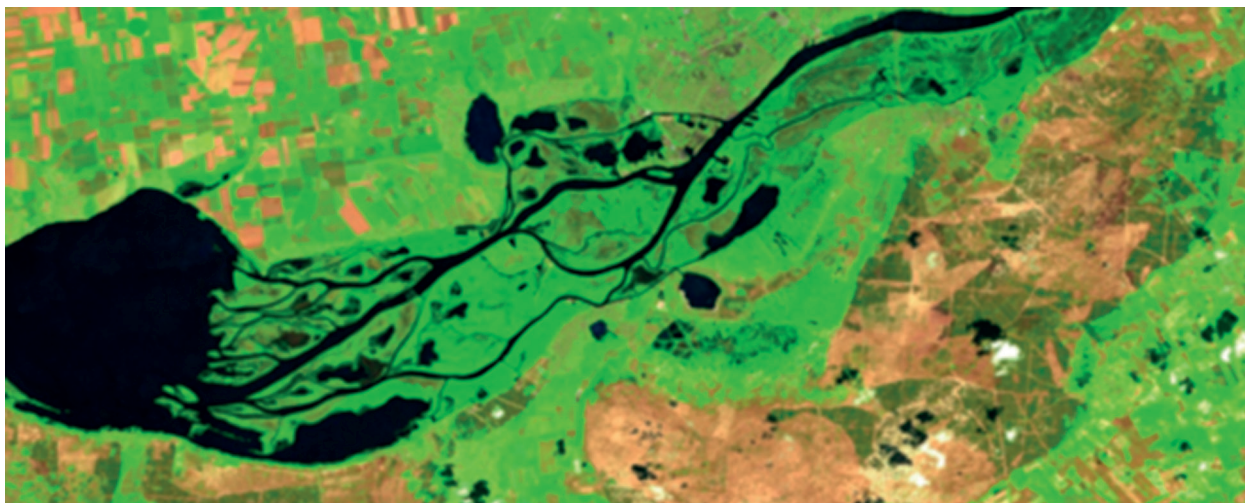


Рис. 2. RGB-композиция восточной части водохранилища, сканер OLI Landsat 18 июня

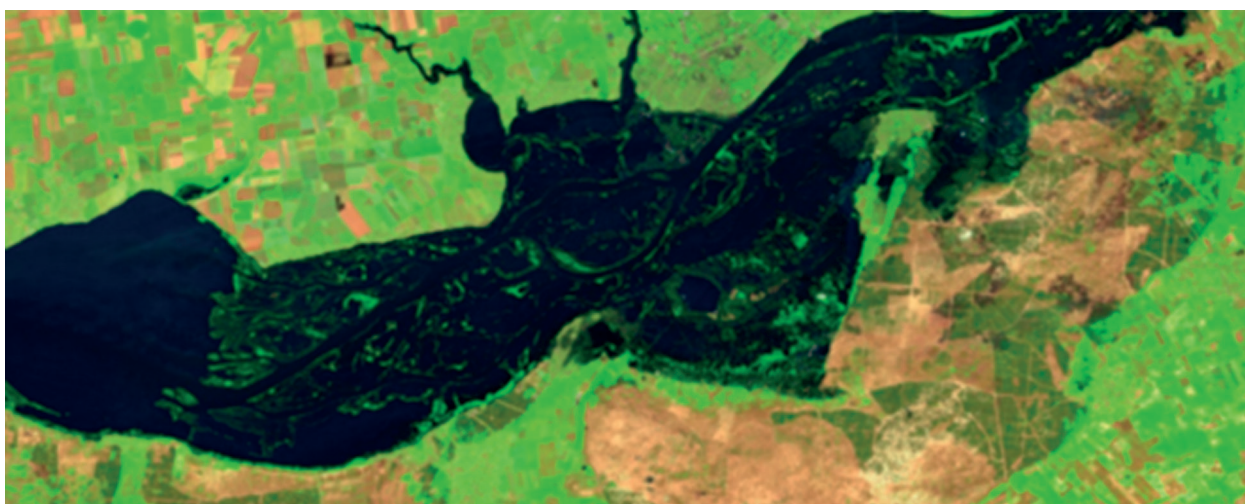
Затопление долины Днепра ниже плотины

В результате разрушения плотины образовался мощный поток с перепадом высот до 14–15 м, что привело к затоплению территории на протяжении 90 км ниже плотины вплоть до Днепро-Бугского лимана. Максимальный подъём воды до 9–10 м наблюдался в районе Новой Каховки и прилегающих территориях. В нижнем течении, в населённых пунктах Голая пристань и Алёшки, уровень воды поднялся на 3–4 м, затопив большое количество строений. На *рис. 3* (см. с. 310) приведены снимки сканера OLI за 1, 9 и 18 июня; представленные карты являются RGB-композициями (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий) каналов 6, 5, 4, наиболее хорошо отделяющих воду от суши. Как видно, 9 июня почти вся пойменная часть была затоплена и подтоплены населённые пункты. Пик подъёма вод прошёл достаточно быстро, и уже к 13 июня ситуация в низовьях реки почти вернулась в нормальное состояние. Карта за 18 июня демонстрирует этот факт. Затопление долины Днепра ниже плотины привело к человеческим жертвам, на момент написания статьи количество погибших составляло 35 человек. Всей экосистеме был нанесён огромный

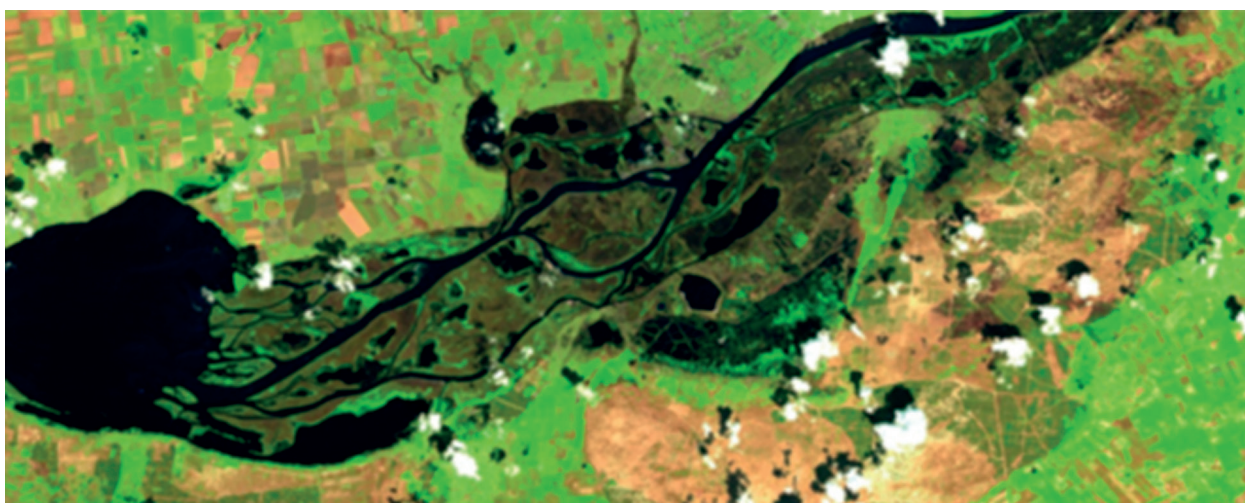
ущерб, учитывая гибель животных, уничтожение растений и интенсивное загрязнение. На карте за 18 июня хорошо видно уменьшение участков с вегетацией после спада воды.



а



б



в

Рис. 3. Снимки приустьевой части долины Днепра со сканера OLI Landsat-8, -9 до и после затопления: *а* — 1 июня; *б* — 9 июня; *в* — 18 июня

Вынос загрязнений в Чёрное море и их распространение

Огромный объём воды вынес в море большое количество минеральных и органических загрязнений, которые изменили оптические свойства воды на шельфе и хорошо трассировались на спутниковых изображениях. На начальном этапе пресные мутные воды сформировали достаточно большой антициклонический круговорот, вытянутый от Днепро-Бугского лимана до Одесского зал. Эта зона видна на снимке сканера MODIS Terra за 9 июня (рис. 4а). Проведённый прогностический расчёт движения загрязнённых вод комплексом FOTS (англ. Floating Objects Tracking System) (Кубряков и др., 2019) показал движение днепровских вод на юго-запад (рис. 4б). Снимок сканера MODIS Terra за 18 июня (рис. 4в) подтверждает правильность прогноза. Изменение состава биогенов с выносом реки может стимулировать развитие специфических видов фитопланктона. Уже на снимках за 15 июня наблюдалась область с оптическими характеристиками, типичными для развития цианобактерий (Кубряков et al., 2021). Области развития цианобактерий характеризуются повышенным рассеянием и достаточно хорошо выделяются на снимках в зелёном канале. На рис. 4г представлен снимок сканера MSI с устранённой отражённой компонентой за 18 июня.

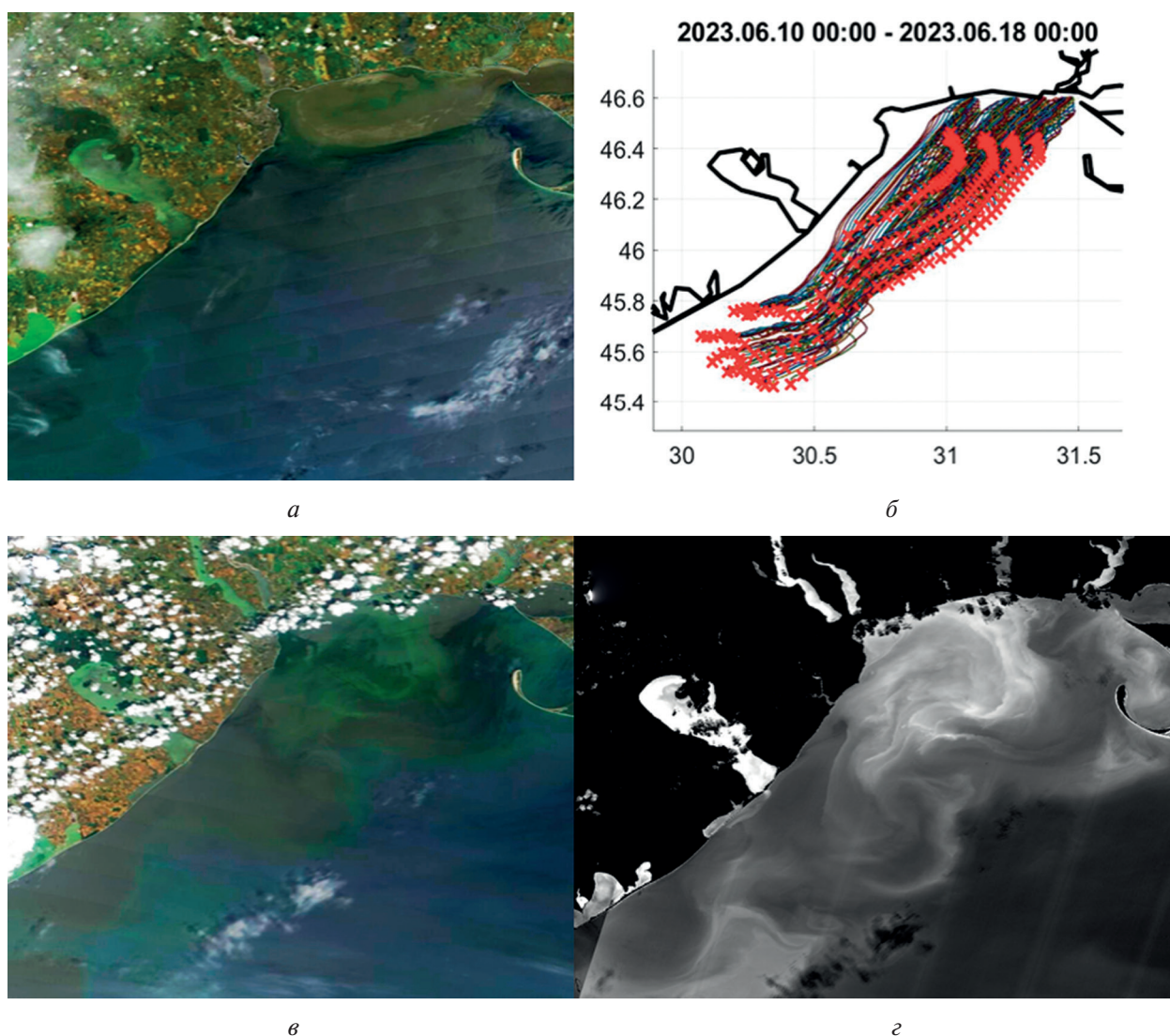


Рис. 4. Проявление, распространение загрязнённых вод, результаты прогностического моделирования и развитие цианобактерий

Заключение

Оперативное использование многоканальных спутниковых данных показало высокую эффективность для анализа ситуации с разрушением плотины Каховского вдхр. и получения объективной информации о последствиях. Проведены оценки расхода воды, выделены зоны затопления и осушки, выполнено прогностическое моделирование распространения загрязнённых вод на шельфе. Отмечено стимулированное поступлением загрязнённых вод развитие цианобактерий.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-27-00421 «Развитие методов спутникового мониторинга аномальных процессов в морских экосистемах на основе многоспектрального подхода». Данные сканера MODIS получены в рамках госзадания FNNN-2021-0003.

Литература

1. Кубряков А. А., Станичный С. В., Калинин Е. И., Кучейко А. Ю., Станичная Р. Р., Медведева А. В. Применение лагранжевых методов для исследования динамических процессов и транспорта плавающих объектов в океане // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли — RORSE 2018: сб. ст. конф. 2019. С. 9–16. <https://doi.org/10.21046/rorse2018.9>.
2. Лаврова О. Ю., Бочарова Т. Ю., Митягина М. И., Строчков А. Я. Спутниковый мониторинг последствий разлива катастрофического разлива нефтепродуктов в Керченском проливе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 1. С. 409–420.
3. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г. Катастрофический разлив нефти в Мексиканском заливе в апреле — мае 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 67–72.
4. Медведева А. В., Станичный С. В. Морская слизь — проявление в данных спутникового дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 314–319. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-314-319>.
5. Kubryakov A. A., Lishaev P. N., Aleskerova A. A., Stanichny S. V., Medvedeva A. A. Spatial distribution and interannual variability of cyanobacteria blooms on the North-Western shelf of the Black Sea in 1985–2019 from satellite data // Harmful Algae. 2021. V. 110. Art. No. 102128. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.102128>.

Multispectral satellite data for monitoring processes after the destruction of Kakhovka Reservoir dam on 6 June 2023

S. V. Stanichny, R. R. Stanichnaya, A. A. Kubryakov

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mails: sstanichny@mail.ru, rrsta@mail.ru

High spatial resolution satellite data show effectiveness in monitoring man-made and natural disasters and studying their impact on the environment. This paper considers the situation that arose in the lower channel of the Dnieper, Kakhovka Reservoir and the north-western shelf of the Black Sea after the destruction of the dam of the Kakhovskaya hydroelectric power station by the Ukrainian armed forces. Based on regular monitoring of the situation in the disaster area using satellite data of optical range — MSI Sentinel-2 OLI Landsat and SAR-C Sentinel-1 radar, data were obtained on the development of flooding of areas below the dam and the drainage of the reservoir. Additionally, data on the bathymetry of the reservoir and maps of the terrain were used. The distribution of polluted waters on the north-western shelf is considered using data from MODIS scanners and the FOTS model. The development of cyanobacteria in the contaminated zone was noted. The paper presents the results obtained within 2 weeks after the explosion of the dam.

Keywords: multispectral methods, Kakhovka Reservoir, anthropogenic catastrophe, pollution, flood

Accepted: 24.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-307-313

References

1. Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Kalinin E. I., Kucheiko A. Yu., Stanichnaya R. R., Application of Lagrange Methods for Studying Dynamic Processes and Floating Objects Transport in the Ocean, *Informatsionnye tekhnologii v distantsionnom zondirovanii Zemli — RORSE 2018* (Information Technologies in Remote Sensing of the Earth — RORSE 2018), Proc. Conf., 2019, pp. 9–16 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/rorse2018.9>.
2. Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu., Mityagina M. I., Stochkov A. Ya., Satellite monitoring of the aftereffects of a catastrophic oil spill in the Kerch Strait, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 6, No. 1, pp. 409–420 (in Russian).
3. Lavrova O. Yu., Kostyanoi A. G., Catastrophic oil spill in the Gulf of Mexico in April–May 2010, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 6, pp. 67–72 (in Russian).
4. Medvedeva A. V., Stanichny S. V., Sea slime: manifestation in satellite remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 314–319, DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-314-319 (in Russian).
5. Kubryakov A. A., Lishaev P. N., Aleskerova A. A., Stanichny S. V., Medvedeva A. A., Spatial distribution and interannual variability of cyanobacteria blooms on the North-Western shelf of the Black Sea in 1985–2019 from satellite data, 2021, *Harmful Algae*, Vol. 110, Art. No. 102128, <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.102128>.