

Исследование оптических характеристик над Горьковским водохранилищем в летние сезоны 2016 и 2017 гг.

Д. В. Калининская¹, А. А. Мольков², А. А. Алескерова¹

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия*

² *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*
E-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru

Горьковское водохранилище является ярким примером эвтрофного водоёма. Экологическое состояние водохранилища обычно ухудшается из-за постоянного увеличения антропогенной нагрузки и поэтому требует комплексной разработки методов регулярного мониторинга, анализа спутниковых данных и данных оптических характеристик. Для разработки регионального алгоритма определения гидрологических параметров резервуара по спутниковым данным необходимо провести атмосферную коррекцию, что невозможно без измерения основных оптических характеристик атмосферного аэрозоля над исследуемой областью. Во время экспедиционной работы с 2016 по 2017 г. эти характеристики были измерены с помощью фотометра SPM и начаты наблюдения за изменчивостью атмосферной прозрачности над Горьковским водохранилищем, но накопленные данные недостаточны для получения пространственно-временной изменчивости региональных аэрозольных характеристик. Результаты обработки данных экспедиций показали необходимость проведения дальнейших комплексных исследований с помощью оптических фотометров, гидрохимических приборов и данных спутников Landsat-8 и Sentinel-2. Анализированные спутниковые изображения за исследуемый период иллюстрируют распространение цианобактерий вдоль Горьковского водохранилища. После создания регионального алгоритма можно будет оценить их концентрацию и сравнить её с данными, полученными во время экспедиций.

Ключевые слова: Landsat, SPM, Sentinel, аэрозоль, Горьковское водохранилище

Одобрена к печати: 06.12.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-216-222

Горьковское водохранилище является одним из восьми водоёмов, созданных в прошлом столетии на главной водной артерии центральной России — р. Волге. Большая часть затопленных площадей охарактеризовалась малыми глубинами и слабыми течениями, и, как результат, хорошо прогретыми водами, где активно стало развиваться цветение водорослей. Одновременно с этим функционирование прибрежных городов и активная сельскохозяйственная деятельность внесли вклад в химический состав воды и экологическое состояние реки. Регистрация ключевых гидрологических характеристик каждого из водохранилищ производилась регулярно с момента их основания и по 1980-е гг. (Минеева, 2004, 2007; Охупкин и др., 1997), после чего произошло существенное сокращение станций мониторинга и экспедиционных работ.

Данные высокого пространственного разрешения Landsat-8 и Sentinel-2 дают возможность проводить мониторинг состояния небольших водоёмов дистанционно. Однако для получения достоверной информации о состоянии водной поверхности необходимо проводить атмосферную коррекцию. Решение этой задачи возможно только при учёте аэрозольных компонент атмосферы, которые влияют на многие физико-химические процессы и относятся к числу климатообразующих факторов. Аэрозоль имеет критически большое значение, особенно при обработке данных спутниковых наблюдений, когда аэрозольный вклад в измеряемую яркость составляет (в видимой области спектра) около 90 % (Sakerin et al., 2008). Аэрозоль оказывает существенное влияние на спектральную прозрачность атмосферы и процессы радиационных взаимодействий. Его основной характеристикой, определяющей интегральное (в столбе атмосферы) ослабление оптического излучения, является аэрозольная оптическая толщина (АОТ), которая имеет спектральные особенности, зависящие от размеров

и показателя преломления аэрозольных частиц. Создание методов обработки экспериментальных данных по атмосферным параметрам с целью исследования временной изменчивости аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы — важная задача, поскольку АОТ является одним из основных параметров, характеризующих рассеивающий и поглощающий эффекты для солнечной радиации в атмосфере. В исследованиях АОТ атмосферы информации об исследованиях изменчивости аэрозольной компоненты над средней полосой территории России, в частности над Нижегородской областью, найдено не было.

С целью мониторинга состояния вод необходимо разрабатывать региональные алгоритмы для определения хлорофилла, концентрации взвешенного вещества и цианобактерий, цветение которых имеет существенное влияние на рекреационную привлекательность водоёмов. Интенсивное цветение цианобактерий приводит к кислородному голоданию в верхних слоях водоёмов, а выделяемые их отмирающими клетками токсины опасны для всех живых организмов.

Для получения сведений о распространении цианобактерий использовались данные со спутников Landsat-8 и Sentinel-2 за периоды проведения экспедиционных исследований на Горьковском водохранилище, которые были взяты с портала glovis.usgs.gov. Информация, полученная с этих спутников, позволяет определять оптические и температурные характеристики водной поверхности с высоким разрешением (15–100 м). За указанный период были отобраны безоблачные сцены, на которых наблюдаются цианобактерии. Сложность получения спутниковых данных для Горьковского водохранилища состоит в том, что спутники Landsat-8 и Sentinel-2 нерегулярны. Они предоставляют информацию один раз каждые 16 дней и один раз в неделю соответственно.

Площадь рассматриваемого региона относительно небольшая, часто покрытая сплошной облачностью, что обуславливает ещё одну сложность обработки спутниковых снимков для Горьковского водохранилища. По спутниковым снимкам цианобактерии можно различить как нитчатые структуры на поверхности воды, которые хорошо просматриваются на композитных изображениях (RGB) при использовании комбинаций каналов для получения «естественного цвета». При анализе спутниковых снимков для их выделения использовались измерения в ближнем ИК-диапазоне, в котором они имеют значительно повышенные значения яркости по сравнению с чистой водой.

Первые наблюдения за прозрачностью атмосферы, а также измерения основных оптических характеристик над данным регионом были выполнены солнечным фотометром с 1 по 6 августа 2016 г. В рамках экспедиции с помощью портативного фотометра проводились исследования спектральной прозрачности атмосферы над акваторией Горьковского водохранилища, а также были произведены фотографии яркости небосвода. В измерениях использовался портативный солнечный фотометр SPM (Сакерин и др., 2012), работающий в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм. По данным спектральных измерений определялись АОТ $\tau^a(\lambda)$, влагосодержание атмосферы W , параметры Ангстрема α и β , а также две составляющие АОТ, обусловленные ослаблением радиации грубо- (τ^c) и мелкодисперсным (τ^f) аэрозолем (Исследование..., 2012; Сакерин, Кабанов, 2015):

$$\tau^a(\lambda) = \tau^c + \tau^f(\lambda) \approx \tau^c + m\lambda^{-n}, \quad (1)$$

где m и n — параметры спектральной зависимости $\tau^f(\lambda)$ (значения τ^f в данной работе, как и ранее (Сакерин и др., 2017; Шифрин и др., 1985), представлены для длины волны 0,5 мкм).

Измерения за 2016 и 2017 гг. проводились в ясную солнечную погоду, однако за этот период были дни, которые сопровождались сплошной облачностью (4 августа) и ливнем (3 августа после 12:00). Общее число серий измерений (после отбраковки ложных замеров) составило 232, среднечасовых значений АОТ — 98, дней наблюдений — 15 (рис. 1, см. с. 218).

При исследовании аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм (АОТ(500)) в дни после прохождения дождевого фронта отмечается уменьшение значений АОТ(500) в 9 раз. Этот факт свидетельствует о том, что аэрозоль, находящийся в столбе атмосферы, выпал вместе с осадками.

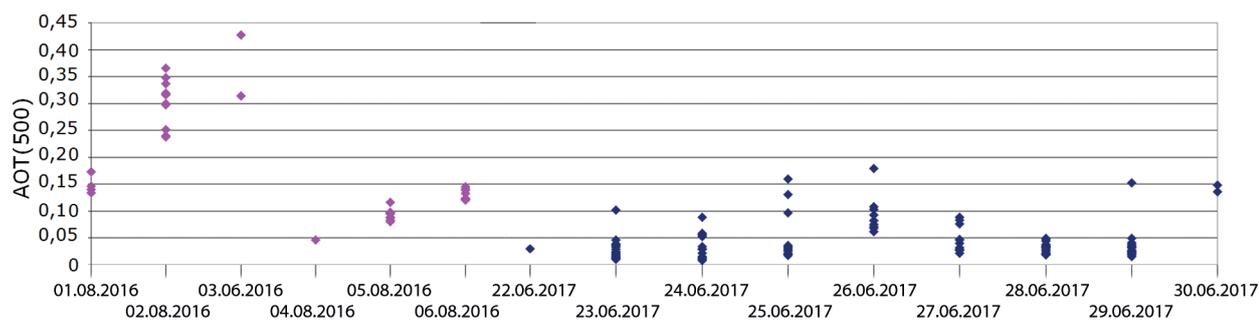


Рис 1. Среднедневная изменчивость $\tau^a(0,5)$ за 2016 и за 2017 гг.

При исследовании микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля отмечается превалирование мелкой фракции (аэрозольных частиц менее 1 нм) в течение всего исследуемого периода, причём независимо от прохождения дождевого фронта. Среднее значение AOT(500) за 2016 г. составляет 0,18, а за 2017 г. — в 2,5 раза меньше, а именно 0,07. Анализ данных вклада крупной и мелкой аэрозольных фракций в общее распределение AOT за исследуемый период также показал преимущество мелкодисперсных частиц почти во все дни двух экспедиций.

Для изучения данных обратных траекторий перемещения атмосферного аэрозоля часто пользуются моделью международной сети AERONET (Holben et al., 1998), однако для исследуемого региона её использование не представляется возможным: самая ближайшая российская станция этой сети со стороны запада — Moscow_MSU_MO (55° с. ш., 37° в. д.) (рис. 2а, б), а со стороны востока — Yekaterinburg (57° с. ш., 59° в. д.). Все измерения оптических характеристик воды и атмосферы проводились с борта НИС «Геофизик» (рис. 2в).

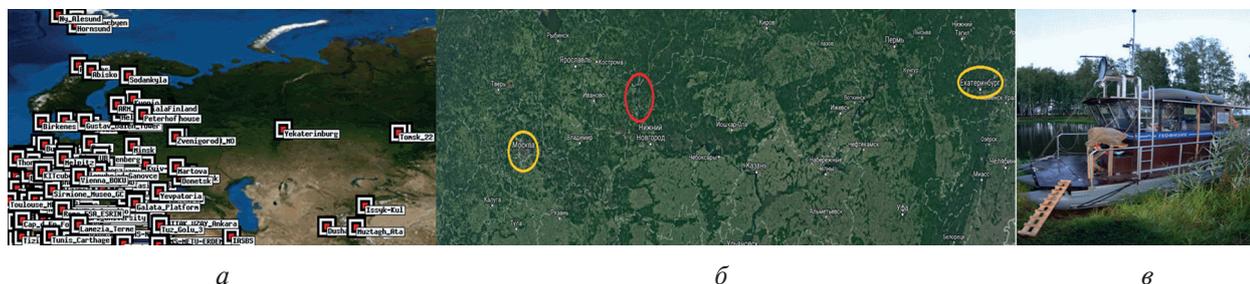


Рис. 2. Карта европейских станций сети AERONET (а); географическое расположение Горьковского водохранилища (красный цвет) и ближайших станций AERONET (оранжевый цвет) (б); НИС «Геофизик» (в)

Анализировать обратные траектории перемещения воздушных масс для региона Горьковского водохранилища можно посредством модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model), разработанной лабораторией атмосферных ресурсов (Air Resources Laboratory (ARL), <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). По результатам моделирования переноса воздушных масс с помощью HYSPLIT как для данных экспедиции с 1 по 6 августа 2016 г., так и данных, полученных с 22 по 30 июня 2017 г., было зафиксировано преимущество западного переноса воздушных масс в исследуемый регион (рис. 3, см. с. 219).

Таким образом, комплексный анализ данных обратных траекторий и использование портативного солнечного фотометра SPM позволили успешно начать наблюдения за изменчивостью характеристик атмосферного аэрозоля над Горьковским водохранилищем и собрать достаточный массив информации для проведения последующего исследования по оценке пространственной изменчивости атмосферного замутнения в исследуемом регионе. А также дали возможность проводить атмосферную коррекцию для разработки регионального алгоритма определения гидрологических показателей для этого водоёма по спутниковым данным.

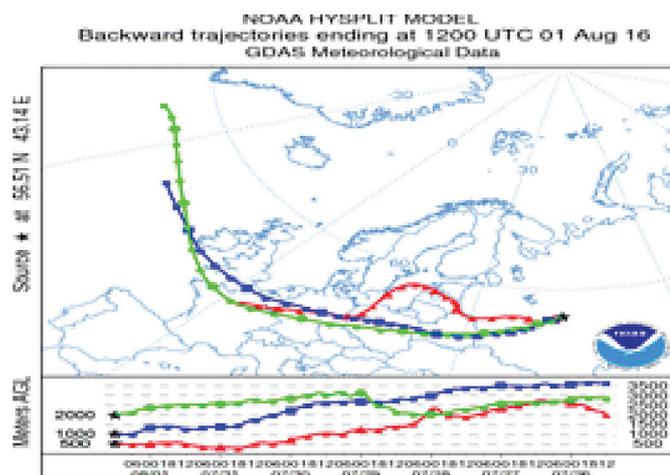


Рис. 3. Моделирование переносов HYSPLIT для региона водохранилища

Проанализированные спутниковые снимки за исследуемый период иллюстрируют распространение цианобактерий по акватории Горьковского водохранилища (рис. 4). После создания регионального алгоритма будет возможно оценить концентрацию хлорофилла *a* и провести сопоставление с данными, полученными в ходе экспедиций.

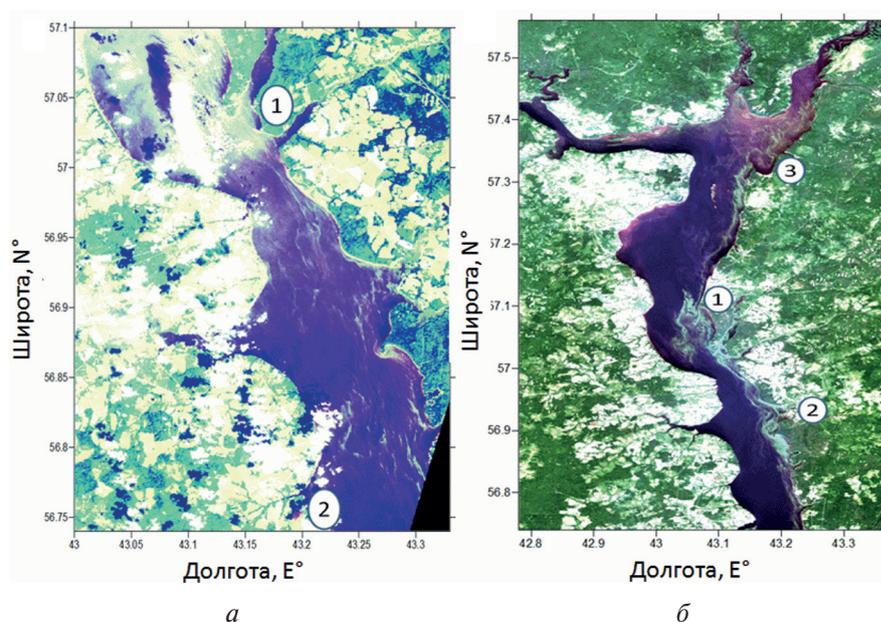


Рис. 4. Композитные изображения (RGB): *a* — Landsat-8 от 14 августа 2017 г.; *б* — Sentinel-2 от 22 августа 2017 г.

На рис. 4а показана часть Горьковского водохранилища, а на рис. 4б оно изображено полностью. На данных снимках за 14 и 22 августа наблюдаются скопления цианобактерий вдоль восточного побережья. Видны три области с максимальным их количеством: от стока р. Морозихи (район 1) и вдоль побережья в северном его направлении до выступающей части, у стока р. Моча и Лоймина (район 2), а также у стока р. Унжи (район 3). За период с 14 по 22 августа над Горьковским водохранилищем практически постоянно наблюдался южный ветер со скоростью до 5 м/с по данным реанализа NCEP. На рис. 5 изображён снимок со спутника Landsat-8 за 24 июня 2016 г. На рис. 5а показано композитное изображение (RGB), на котором видно скопление водорослей у стока р. Немды. Водная поверхность, покрытая цианобактериями, имеет характерный фиолетово-красный оттенок.

нобактериями, занимает площадь около 100 км^2 . Она характеризуется повышенными значениями яркости на длинах волн $0,450\text{--}0,515$ и $0,525\text{--}0,600$ мкм (синий и зелёный спектральные каналы).

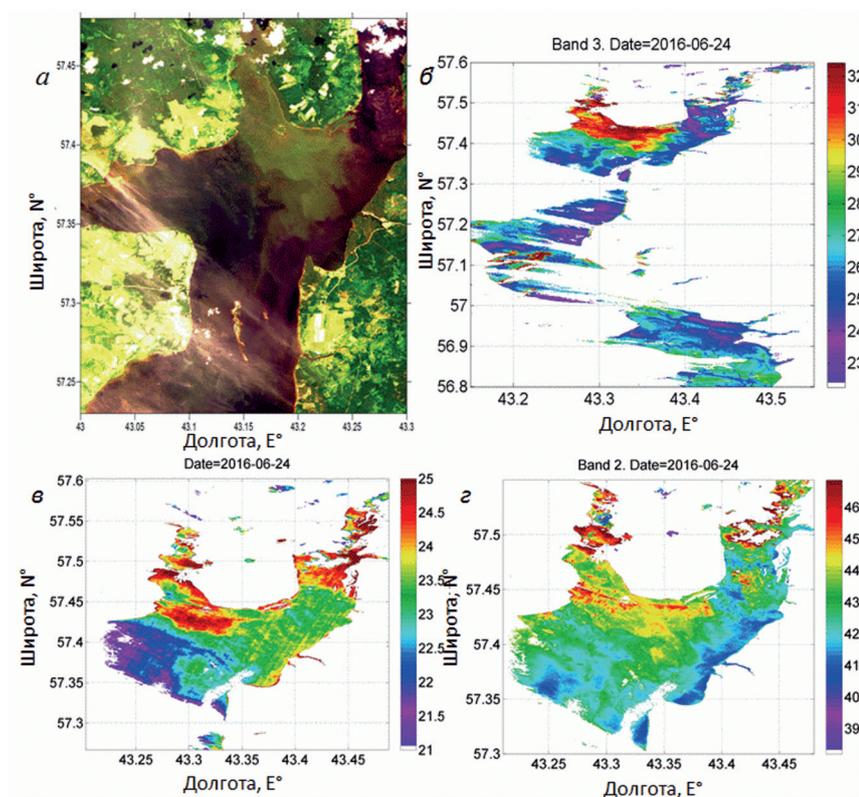


Рис. 5. Данные спутника Landsat-8 за 24 июня 2016 г.: *a* — композитное изображение (RGB); *б* — яркость излучения на $\lambda = 0,525\text{--}0,600$ мкм; *в* — восстановленные поля температуры; *г* — яркость излучения на $\lambda = 0,450\text{--}0,515$ мкм

На рис. 5*в* представлена температурная карта водной поверхности, восстановленная по региональному алгоритму. Так как прибор TIRS спутника Landsat-8 делает измерения в двух каналах в дальнем ИК-диапазоне, это позволяет провести атмосферную коррекцию измерений и восстановить реальную поверхностную температуру (Aleskerova et al., 2016). Вода, где активно развиваются цианобактерии, имеет температуру около $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (достаточно высокую относительно средней температуры окружающих вод Горьковского водохранилища $23,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Область с повышенными значениями температуры относительно окружающих вод совпадает с областью повышенных значений яркости во 2-м и 3-м спектральных каналах Landsat-8 (см. рис. 5*б*, *г*).

Горьковское водохранилище является ярким примером эвтрофного водоёма. Его экологическое состояние в целом ухудшается вследствие постоянно растущей антропогенной нагрузки, а потому требует комплексного развития методов регулярного мониторинга, анализа спутниковых данных и данных оптических характеристик.

Для разработки регионального алгоритма определения гидрологических показателей водоёма по спутниковым данным необходимо проводить атмосферную коррекцию, что не является возможным без осуществления измерений ослабления прямой солнечной радиации над исследуемым регионом. В ходе экспедиционных работ за 2016 и 2017 гг. были измерены АОТ и начаты наблюдения за изменчивостью характеристик атмосферного аэрозоля над Горьковским водохранилищем, однако накопленных данных недостаточно для получения пространственно-временной изменчивости аэрозольных характеристик региона. Результаты обработки данных экспедиций за исследуемый период показали необходимость проведения

дальнейшего комплексного исследования Горьковского водохранилища как посредством оптических фотометров и гидрохимических приборов, так и спутников Landsat-8 и Sentinel-2.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 17-77-10120 (обработка и анализ данных по оптическим характеристикам атмосферного аэрозоля над Горьковским водохранилищем) и темы госзадания № 0827-2014-0011 (предоставление данных натуральных измерений посредством портативного фотометра SPM). Авторы благодарят Сакерина С. М. и Кабанова Д. М. за предоставление фотометра SPM и программного обеспечения к нему.

Литература

1. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / под общей ред. С. М. Сакерина. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. 484 с.
2. Минеева Н. М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004. 156 с.
3. Минеева Н. М. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус, 2007. 279 с.
4. Оханкин А. Г., Микульчик И. А., Корнева Л. Г., Минеева Н. М. Фитопланктон Горьковского водохранилища. Тольятти, 1997. 156 с.
5. Сакерин С. М., Кабанов Д. М. Мелко- и грубодисперсные компоненты аэрозольной оптической толщи атмосферы в морских и полярных районах // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 8. С. 690–697.
6. Сакерин С. М., Кабанов Д. М., Ростов А. П., Турчинович С. А., Князев В. В. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 12. С. 1112–1117.
7. Сакерин С. М., Голобокова Л. П., Кабанов Д. М., Польшин В. В., Турчинович Ю. С., Ходжер Т. В., Хуриганова О. И. Пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля на маршруте Индо-Атлантической экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 1. С. 42–52. DOI: 10.15372/AOO20170106.
8. Шифрин К. С., Волгин В. М., Волков Б. Н., Еришов О. А., Смирнов А. В. Оптическая толщина аэрозоля атмосферы над морем // Исследование Земли из космоса. 1985. № 4. С. 21–30.
9. Aleskerova A. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V. A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. No. 9. P. 1155–1161.
10. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanre D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., Kaufman Y. J., Nakadjima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sensing of Environment. 1998. V. 66(1). P. 1–16.
11. Sakerin S. M., Kabanov D. M., Smirnov A. V., Holben B. N. Aerosol optical depth of the atmosphere over ocean in the wavelength range 0.37–4 μm // Intern. J. Remote Sensing. 2008. V. 29. Iss. 9. P. 2519–2547. DOI: 10.1080/01431160701767492.

Investigation of optical characteristics over the Gorky Reservoir in the summer seasons of 2016 and 2017

D. V. Kalinskaya¹, A. A. Molkov², A. A. Aleskerova¹

¹ Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia

² Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru

The Gorky Reservoir is a prime example of a eutrophic reservoir. The ecological state of the reservoir usually deteriorates due to the constant increase in anthropogenic load and therefore requires a complex development of methods for regular monitoring, analysis of satellite data and data on

optical characteristics. To develop a regional algorithm for determining the hydrological parameters of the reservoir using satellite data it is necessary to carry out atmospheric correction, which is impossible without measuring the main optical characteristics of atmospheric aerosol over the study region. During the expeditionary work from 2016 to 2017, these characteristics were measured using an SPM photometer and observations of the atmospheric transparency variability over the Gorky Reservoir were started but the accumulated data are insufficient to obtain the spatial and temporal variability of regional aerosol characteristics. The results of Gorky Reservoir expedition data processing showed that for further comprehensive research it is needed to use optical photometers, hydrochemical instruments and satellite data from Landsat-8 and Sentinel-2. The analyzed satellite images for the study period illustrate the spreading of cyanobacteria along the Gorky Reservoir. After creating a regional algorithm, it will be possible to estimate the concentration of cyanobacteria and compare it with the data obtained by expeditions.

Keywords: Landsat, SPM, aerosol, Sentinel

Accepted: 06.12.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-216-222

References

1. *Issledovanie radiatsionnykh kharakteristik aerolya v aziatskoi chasti Rossii* (Study of radiative characteristics of aerosol in Asian part of Russia), Sakerin S. M. (ed.), Tomsk: Publ. House of Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2012, 484 p.
2. Mineeva N. M., *Rastitel'nye pigmenty v vode volzhskikh vodokhranilishch* (Plant pigments in the waters of the Volga river reservoirs), Moscow: Nauka, 2004, 156 p.
3. Mineeva N. M., *Pervichnaya produktsiya planktona v vodokhranilishchakh Volgi* (Plankton primary production in the Volga River reservoirs), Yaroslavl: Printkhaus, 2007, 279 p.
4. Okhapkin A. G., Mikulchik I. A., Korneva L. G., Mineeva N. M., *Fitoplankton Gor'kovskogo vodokhranilishcha* (Phytoplankton of the Gorky Reservoir), Tolyatti, 1997, 156 p.
5. Sakerin S. M., Kabanov D. M., Fine and Coarse Components of Atmospheric Aerosol Optical Depth in Maritime and Polar Regions, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, Vol. 28, No. 06, pp. 510–517.
6. Sakerin S. M., Kabanov D. M., Rostov A. P., Turchinovich S. A., Knyazev V. V., Sun Photometers for Measuring Spectral Air Transparency in Stationary and Mobile Conditions, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2012, Vol. 25, No. 04, pp. 352–356.
7. Sakerin S. M., Golobokova L. P., Kabanov D. M., Pol'kin V. V., Turchinovich Yu. S., Khodzher T. V., Khuriganova O. I., Spatiotemporal Variations in Aerosol Characteristics Along the Route of the Indian-Atlantic Expedition Onboard the Research Vessel Akademik Nikolaj Strakhov, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2017, Vol. 30, No. 4, pp. 349–359.
8. Shifrin K. S., Volgin V. M., Volkov B. N., Ershov O. A., Smirnov A. V., Opticheskaya tolshchina aerolya atmosfery nad morem (Optical depth of atmospheric aerosols above sea), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 1985, No. 4, pp. 21–30.
9. Aleskerova A. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 1155–1161.
10. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanre D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., Kaufman Y. J., Nakadjima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A., AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, 1998, Vol. 66, No. 1, pp. 1–16.
11. Sakerin S. M., Kabanov D. M., Smirnov A. V., Holben B. N., Aerosol optical depth of the atmosphere over ocean in the wavelength range 0.37–4 μm , *Intern. J. Remote Sensing*, 2008, Vol. 29, Issue 9, pp. 2519–2547, DOI: 10.1080/01431160701767492.