ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А» В ЦИМЛЯНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ OLCI (2016–2019 гг.)

В.В.Сапрыгин¹, А.В.Клещенков¹, А.М.Коршун²

¹Южный научный центр РАН

²СКФ МТУСИ

saprygin@ssc-ras.ru, geo@ssc-ras.ru, a_korshyn@mail.ru

Аннотация. С применением разработанного в ЮНЦ РАН алгоритма на основе спутниковых снимков сканера OLCI за период 2016–2019 гг. и данных экспедиционных исследований проанализировано пространственно-временное распределение концентрации хлорофилла «а» в Цимлянском водохранилище в современный период. Проведено сравнение последних данных с периодом 2003–2012 гг., охваченным съёмкой спутникового сканера MERIS. По данным спутниковых съёмок в акватории Цимлянского водохранилища за 2003–2012 и 2016–2019 гг. можно выделить два ежегодно повторяющихся пика развития фитопланктона в приплотинном и центральном участках: весенний, связанный с цветением диатомовых водорослей и летне-осенний, обусловленный бурным развитием сине-зеленых водорослей. Установлено, что картина сезонной динамики концентрации хлорофилла «а» в центральном и приплотинном районах водохранилища в современный период не претерпела значительных изменений в сравнении с 2003–2012 гг. Однако, в верхнем районе водохранилища сезонная динамика концентрации хлорофилла «а» в современный период стала очень похожа на таковую в центральном районе. При этом средние значения концентрации хлорфилла «а» значительно возросли, что может свидетельствовать об изменении гидрологического режима водохранилища.

Ключевые слова: Цимлянское водохранилище, хлорофилл а, дистанционное зондирование, спутниковые снимки, OLCI, MERIS.

Материалы и методы. Сканер цвета OLCI, функционирующий на борту спутников Sentinel-3А и Sentinel-3В, производит съёмку в 21 диапазоне спектра. Из них 15 соответствуют каналам прекратившего работу MERIS, пространственное разрешение так же составляет 300 м.

Использовали снимки второго уровня обработки, привязанные географически и содержащие коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) с учетом атмосферной коррекции «Bright pixel», применявшейся и для снимков MERIS [1, 2]. Всего обработано 2706 снимков с 16 апреля 2016 по 23 декабря 2019 г., включая 244 снимка сделанных со спутника Sentinel-3В начиная с 19 марта 2019 г.

Расчёты полей распределения концентрации хлорофилла «а» (КХЛа) (мг/м³) в Цимлянском водохранилище выполняли при помощи разработанного двухканального алгоритма [3]:

$$KXLa = 54,597(R_{665}^{-1} \times R_{709}) - 26,451 \quad (1)$$

где R_{665} – КСЯ около максимума поглощения хлорофилла «а» в красном диапазоне спектра на 665 нм (8 канал OLCI), а R_{709} представляет собой пик коэффициента спектральной яркости около 709 нм, обусловленный совместным поглощением света хлорофиллом и водой (11 канал OLCI).

Расчёт проводили в 5 этапов:

- исключали пиксели, для которых процедура атмосферной коррекции приводила к отрица-

- тельным значениям КСЯ на длине волны 490 нм;
- исключали пиксели, распознанные стандартными алгоритмами как суша, облака, лёд или дымка;
- для оставшихся пикселей вычисляли КХЛа по формуле (1);
- пикселям, в которых рассчитанные КХЛа оказались отрицательными, присваивали значение 0;
- значения КХЛа, большие 150 мг/м³, заменяли на 150.

Для исключения выбросов полученные поля КХЛа подвергались процедуре фильтрации при помощи алгоритма, учитывающего наблюдаемую in situ изменчивость КХЛа.

Для трех районов Цимлянского водохранилища, представленных на Рис. 1 рассчитаны среднемесячные величины КХЛа при условии, что корректные значения КХЛа имеются не менее чем для половины площади данного района (Рис. 2Б). Также рассчитаны средние значения КХЛа для каждого календарного сезона по годам и среднемноголетние значения КХЛа для каждого месяца (Рис. 3Б) для каждого района.

Результаты и обсуждение. По данным спутниковых съёмок в акватории Цимлянского водохранилища за 2003–2012 и 2016–2019 гг. можно выделить два ежегодно повторяющихся пика (весенний и летне-осенний) развития фитопланктона в приплотинном и центральном участках (и следующие

за ними периоды депрессии). В марте-апреле, редко в мае (2003, 2005, 2010 гг.) КХла достигает первого максимума (Рис.2, 3). Весенний пик соответствует массовому развитию диатомового комплекса фитопланктона, что подтверждают данные полевых спектрометрических наблюдений. Весенний

максимум наблюдается зачастую на месяц раньше на приплотинном районе в сравнении с центральным; до минимальных значений КХла снижается к маю-июню, в центральном районе зачастую на месяц позже.

1 – приплотинный, 2 – центральный, 3 – верхний районы
Рис.1 – Районирование Цимлянского водохранилища по [4]

Второй пик развития фитопланктонного сообщества Цимлянского водохранилища, связанный с бурным ростом теплолюбивых видов и цветением сине-зеленых водорослей, наблюдается в июле-августе, редко в сентябре (2011, 2017, 2019 гг.). Как правило, летне-осенний период развития планктона продолжительнее весеннего (Рис. 2, 3) и характеризуется более высокими значениями КХла.

Для верхнего района картина сезонной динамики КХла менялась из года в год (Рис.2А), при этом среднее содержание хлорофилла было существенно ниже, чем для центрального и приплотинного районов во все сезоны. В современный период (2016–2019 гг.) динамика развития планктонного сообщества в верхнем районе соответствует таковой в центральном районе (Рис.2Б, Рис.3Б). Средние значения КХла в районе теперь гораздо ближе к таковым в двух других районах (Рис.3Б), причём в отдельных случаях превышают пиковые значения (лето 2016 г., весна 2019 г.) (Рис.2Б).

Таким образом, в 2002–2012 гг. среднее содержание хлорофилла в верхнем районе было существенно ниже, чем для центрального и приплотинного участков. В 2016–2017 гг. КХа в верхнем районе достигала

того же уровня, что и в двух других районах. А в 2018 г. снова стала ниже, что можно связать с высоким уровнем паводковых вод в этом году.

Такое изменение в весеннем цветении в пределах верхнего района может быть связано с сокращением стока весеннего половодья и увеличением доли грунтовых вод, поступающих в водохранилище, которые, как правило, характеризуются повышенным содержанием биогенных элементов по сравнению с талыми водами. Другой причиной интенсификации цветения может быть возможное увеличение средней температуры воды в весенний период в пределах верхнего района, так как грунтовые воды часто имеют более высокую температуру по сравнению с талыми водами весеннего половодья. Еще одним возможным фактором, определяющим здесь весеннее цветение, может быть мобилизация биогенов из донных отложений. В любом случае, по всей видимости, ключевым фактором является изменившееся соотношение различных по генезису вод, а именно сокращение стока весеннего половодья и рост грунтового питания в весенний период, однако конкретные механизмы такого влияния требуют дальнейшего изучения.

1-приплотинный, 2- центральный, 3 – верхний районы

Рис. 2. Многолетняя динамика КХЛа по районам Цимлянского водохранилища по данным OLCI в 2016–2019 гг. (Б) в сравнении с данными MERIS за 2003–2012 гг. (А)

Экспедиционные контактные и дистанционно измеренные спектральные данные в 2019 г., сопоставимые со спутниковыми (точка съёмки находится на расстоянии более двух пикселей от берега, что для снимков OLCI составляет примерно 600 м), охватывают юго-западную часть приплотинного района, согласно Рис. 4. Весной спектры коэффициентов спектральной яркости (СКСЯ), представлены категориями от первой до пятой. Преобладают спек-

тры третьей категории, что соответствует диапазону КХЛа 3–50 мг/м³ и мезотрофному трофическому статусу водного объекта [5]. Диапазон аналитических измерений КХЛа составил 3–36 мг/м³. Обе оценки соответствуют спутниковым данным, что прослеживается на Рис.4А. Осенью зарегистрированы спектры коэффициентов спектральной яркости от третьей до шестой категории, что соответствует диапазону КХЛа 10–150 мг/м³. Преобладают спек-

тры пятой категории, что соответствует эвтрофно-полиэвтрофному трофическому статусу водного объекта. Пятна цветущих синезеленых водорослей дрейфовали по всему водохранилищу. Один спектр второй категории зафиксирован на станции 17 (в заливе г. Волгодонска) при съёмке с берега. Диапазон аналитических измерений КХЛа составил 2–30 мг/м³. Настолько низкие значения несколько расходятся с тем, что зоны цветений синезелёных

водорослей отмечены визуально во время экспедиции и на рассчитанных полях распределения КХЛа по спутниковым данным (Рис. 4Б и 4В), а также подтверждаются данными спектрометрических измерений. Таким образом, одновременное использование нескольких методов оценки КХЛа позволяет выявить источник возможных ошибок, что было бы затруднительно при использовании одного или двух методов.

1-приплотинный, 2- центральный, 3 – верхний районы
Рис. 3. Сезонная динамика КХЛа по участкам Цимлянского водохранилища по данным OLCI в 2016–2019 гг. (Б) в сравнении с данными MERIS за 2003–2012 гг.(А)

Таким образом в заключение можно отметить следующее:

- Картина сезонной динамики КХЛа в центральном и приплотинном районах в современный период не претерпела изменений в сравнении с 2003–2012 гг. Средние значения КХЛа остаются на том же уровне, что и раньше.
- В верхнем районе водохранилища сезонная динамика КХЛа в современный период стала повторять таковую в центральном районе.

При этом средние значения КХЛа значительно возросли, что может свидетельствовать об изменении гидрологического режима водохранилища.

- Для объективного мониторинга пространственно-временной изменчивости КХЛа в Цимлянском водохранилище необходимо применять спутниковую информацию. Достоверность количественных оценок желательно контролировать двумя независимыми методами.

А – 24 мая 2019 г, Б – 24 сентября 2019 г, В – 25 сентября 2019 г.

Рис. 4. КХла, рассчитанная по снимкам OLCI в дни проведения экспедиций

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и РГО в рамках научного проекта № 17-05-41145 РГО_а «Изучение трансформации среды и биоты Цимлянского водохранилища и Нижнего Дона в условиях изменения климата»

Литература

1. Aiken J. and Moore G., 2000. ATBD case 2 s bright pixel atmospheric correction, Center for Coastal & Marine Sciences, Plymouth Marine Laboratory, U.K. Rep. PO-TN-MEL-GS-0005, 14 p.
2. Moore G.F., Aiken J. and Lavender S.J., 1999. The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in case II waters: application to MERIS Int. J. Remote Sensing. 20(9) pp. 1713–1733.
3. Moses W.J., Saprygin V., Gerasyuk V., Povazhnyy V., Berdnikov S. and Gitelson A.A. OLCI-based NIR-red models for estimating chlorophyll-a concentration in productive coastal waters – a preliminary evaluation // Environmental Research Communications. 2019. 1(1), p. 011002.
4. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, Водораздельные и Манычские водохранилища. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. – 204 с.
5. Сухоруков Б.Л., Ковалева Г.Е., Новиков И.В. Оценка трофности водных объектов по данным дистанционной спектроскопии высокого разрешения видимого диапазона электромагнитного спектра // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 79–90.

INVESTIGATION OF SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF CHLOROPHYLL "A" CONCENTRATION IN THE TSIMLYANSK RESERVOIR USING OLCI SATELLITE IMAGES (2016–2019)

V.V. Saprygin¹, A.V. Kleshchenkov¹, A.M. Korshun²

¹Southern scientific center of the Russian Academy of Sciences

²North Caucasus Branch of Moscow Technical University of Communications and Informatics

saprygin@ssc-ras.ru, geo@ssc-ras.ru, a_korshyn@mail.ru

Abstract. The spatial and temporal distribution of chlorophyll "a" concentration in the Tsimlyansk reservoir in the modern period was analyzed using an algorithm developed at the SSC RAS based on satellite images of the OLCI scanner for the period 2016–2019 and data from field research. The latest data was compared with the period 2003–2012 covered by the MERIS satellite scanner survey. According to satellite imagery in the water area of the Tsimlyansk reservoir for 2003–2012 and 2016–2019, two annually recurring peaks of phytoplankton development in the dam and central areas can be distinguished: spring, associated with the bloom of diatoms and summer-autumn, due to the rapid development of blue-green algae. It was found that the seasonal dynamics of chlorophyll a concentration in the central and near-dam areas of the reservoir in the modern period has not undergone significant changes in comparison with 2003–2012. However, in the upper region of the reservoir, the seasonal dynamics of chlorophyll a concentration in the modern period has become very similar to that in the central region. At the same time, the average concentration of chlorophyll a has increased significantly, which may indicate a change in the hydrological regime of the reservoir.

Keywords: Tsimlyansk reservoir, chlorophyll a, remote sensing, satellite images, OLCI, MERIS.

References

1. Aiken J. and Moore G., 2000. ATBD case 2 s bright pixel atmospheric correction, Center for Coastal & Marine Sciences, Plymouth Marine Laboratory, U.K. Rep. PO-TN-MEL-GS-0005, 14 p.
2. Moore G.F., Aiken J. and Lavender S.J., 1999. The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in case II waters: application to MERIS Int. J. Remote Sensing. 20(9) pp. 1713–1733.
3. Moses W.J., Saprygin V., Gerasyuk V., Povazhnyy V., Berdnikov S. and Gitelson A.A. OLCI-based NIR-red models for estimating chlorophyll-a concentration in productive coastal waters—a preliminary evaluation // Environmental Research Communications. 2019. 1(1), p. 011002.
4. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ ССРС. Тsimlyanskoe, Vodorazdel'nye i Manychskie vodokhranilishcha. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. – 204 p.(in Russian).
5. Sukhorukov B.L., Kovaleva G.E., Novikov I.V. Assessment of trophic water bodies based on high resolution remote spectrometry of the visible range of the electromagnetic spectrum // Vodnye resursy. – 2017. – Vol. 4, No.1. – pp. 79–90.