Использование спутниковых данных прибора MSI (Sentinel-2) для оценки концентрации хлорофилла *a* в Новосибирском водохранилище

А.Е. Воронова

Сибирский центр «НИЦ «Планета», Новосибирск, 630099, Россия E-mail: 35voran@gmail.com

В работе исследуется возможность применения данных прибора MSI (Sentinel-2) для составления карт концентрации хлорофилла а в поверхностном слое внутренних пресных водоёмов на примере Новосибирского водохранилища. Расчёт концентрации проводился в программном комплексе SNAP при помощи стандартных нейросетевых алгоритмов C2RCC и C2X. Полученные значения сравнивались с натурными данными. Анализ результатов показал хорошее согласие данных in situ и рассчитанной концентрации хлорофилла a только для алгоритма C2X: коэффициент корреляции составил 0,77, а корень из среднеквадратической ошибки — 2,87 мг/м³. Характер распределения хлорофилла *а* в поверхностном слое водохранилища также согласуется с выводами предыдущих исследований, что концентрация хлорофилла а имеет очень широкий диапазон значений (от единиц до сотен миллиграмм на кубический метр). На карте распределения хлорофилла а, полученной по спутниковым данным, хорошо выделяются зоны с экстремально высокими значениями концентрации: Бердский залив и пролив, перекрытый дамбой в районе с. Чингис. Высокие значения концентрации хлорофилла а в Бердском заливе подтверждаются натурными данными. В верхней части водохранилища близ с. Чингис экспедиционные замеры не выполнялись. Спутниковые данные MSI могут служить основой для планирования наземных экспедиций, так как позволяют получать карты характеристик водного объекта целиком и выявлять зоны с максимальными значениями концентрации хлорофилла а.

Ключевые слова: хлорофилл, MSI, Sentinel-2, эвтрофикация, водохранилище, водоём

Одобрена к печати: 19.03.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-199-205

Введение

С каждым годом антропогенная нагрузка на все составляющие биосферы возрастает. Загрязнение атмосферного воздуха, почв, Мирового океана и внутриконтинентальных вод неизбежно приводит к негативным последствиям и ставит под угрозу здоровье и жизнь человека. Пресная вода является одним из важнейших ресурсов для всего живого на Земле и при этом составляет лишь малую часть гидросферы.

Одной из самых распространённых экологических проблем пресных озёр и водохранилищ является их эвтрофикация. Основной причиной эвтрофикации служит антропогенное обогащение воды двумя необходимыми питательными веществами — азотом и фосфором, которые способствуют росту водорослей, бактерий и других микроорганизмов. Эти вещества попадают в водоёмы через сельскохозяйственные удобрения и промышленные сточные воды. Эвтрофикация приводит к вредоносному цветению водорослей, истощению растворённого в воде кислорода, ухудшению рекреационной ценности водоёма и изменению промысловой деятельности (Буканова, 2014).

С 60-х гг. прошлого века проводились исследования возможностей применения методов дистанционного зондирования для мониторинга состояния водной среды (Ogashawara et al., 2017). Основным показателем биомассы фитопланктона в воде является хлорофилл a, концентрацию которого в настоящее время довольно успешно измеряют по спутниковым данным для вод открытого океана (O'Reilly, Werdell, 2019). Но, как показывают исследования (Ansper, Alikas, 2018), случай с внутриконтинентальными водами требует индивидуального подхода ввиду оптической сложности водной среды рек, озёр и водохранилищ.

Объект исследования

Новосибирское водохранилище — крупнейшее в Западной Сибири, единственное на р. Оби — расположено на территории Новосибирской обл. и частично — Алтайского края. Длина водоёма составляет около 200 км, площадь — чуть более 1000 км², средняя глубина — 9 м, наибольшая — 25 м. По морфометрическим и гидрологическим показателям акватория Новосибирского водохранилища делится на три части: нижняя озеровидная часть начинается от плотины и доходит до с. Завьялово, средняя суженная — до с. Усть-Алеус и верхняя мелководная — до г. Камня-на-Оби. Отдельно выделяется Бердский залив, образованный притоком Оби — р. Бердью (*рис. 1*). Водохранилище обеспечивает круглогодичное водоснабжение городов, крупных населённых пунктов и промышленных предприятий (Савкин и др., 2014).



Рис. 1. Схема Новосибирского водохранилища

Новосибирское водохранилище неоднородно по своей структуре и имеет значительные колебания гидрохимических показателей в разных створах. Так, например, глубина видимости белого диска в верхней части водохранилища и приплотинной может различаться в пять раз (Суторихин, Литвиненко, 2017), а концентрация взвешенных веществ — на порядок (по данным Западно-Сибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды). По этой причине отдельные точечные замеры не могут в полной мере описать реальную картину экологического состояния водоёма.

В результате многолетнего мониторинга были обнаружены локальные проявления естественного и антропогенного эвтрофирования Новосибирского водохранилища, при этом диапазон колебания концентрации хлорофилла *а* очень широк: от единиц до сотен миллиграмм на кубический метр (Савкин и др., 2014). Особенно интенсивный процесс эвтрофикации наблюдается в Бердском заливе, что увеличивает риск попадания токсинов в систему водоснабжения г. Бердска (Ермолаева, Двуреченская, 2012).

Данные

Исследование проводилось по спутниковым снимкам высокого разрешения (от 10 до 60 м) с космического аппарата Sentinel-2 (MSI — Multispectral Instrument), что обусловлено относительно небольшими размерами водохранилища и его вытянутой формой (средняя ширина составляет 10 км, а минимальная — 2 км). Продукты первого уровня обработки были получены по сети интернет (https://scihub.copernicus.eu/). Дата съёмки: 16.08.2017.

Натурные данные по концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое воды Новосибирского водохранилища (12 точек отбора) за 16.08.2017 представлены на сайте SIBWATER 1.0, являющемся геоинформационной системой Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (http://sibwater.ict.nsc.ru/).

Методика исследования

Продукты второго уровня обработки были получены с помощью программного комплекса SNAP (http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/), в котором реализован широкий набор инструментов и специализированных модулей для обработки данных с космических аппаратов серий Sentinel-1/2/3 и др. В частности, встроенный процессор C2RCC (Case 2 Regional CoastColour) позволяет получать концентрации хлорофилла *а* в поверхностном слое водных объектов по данным прибора MSI.

Работа процессора основана на использовании нейросетевых алгоритмов (C2RCC и C2X) для расчёта пяти основных биооптических компонент поглощения и рассеяния света частицами в водной среде: поглощения детритом, жёлтым веществом и пигментами фитопланктона; рассеяния «белыми частицами» и «типичным осадком» (Brockmann et al., 2016). Для получения более точных результатов работы рекомендуется задать некоторые параметры водной среды (солёность и температура) и атмосферы (давление и содержание озона), если они известны.

В результате были получены два продукта концентрации хлорофилла *a* по данным прибора MSI: с использованием алгоритмов C2RCC и C2X. Из полученных продуктов была вырезана область интереса (полигон Новосибирского водохранилища), исключены острова, облака и тени от них. Значения пикселей вычислялись в 12 точках, соответствующих местам отбора (*puc. 2*), с использованием значений четырёх соседних ячеек с применением билинейной интерполяции.



Рис. 2. Расположение точек отбора проб воды

В *табл. 1* приведены концентрации хлорофилла *a*, полученные по наземным наблюдениям (*in situ*) и рассчитанные по спутниковым данным с использованием двух алгоритмов (MSI_{C2RCC} и MSI_{C2X}), для всех 12 точек отбора.

№ точки	Местоположение точки	in situ	MSI _{C2RCC}	MSI _{C2X}
1	Ордынское – Нижнекаменка, правый берег	11,61	12,61	11,17
2	Ордынское – Нижнекаменка, середина	9,89	12,21	11,13
3	Ордынское – Нижнекаменка, левый берег	6,99	10,21	8,16
4	Ленинское – Сосновка, правый берег	14,66	10,87	14,90
5	Ленинское – Сосновка, середина	15,16	10,96	14,10
6	Ленинское – Сосновка, левый берег	22,07	11,34	15,45
7	Верхний бьеф (у плотины)	16,41	11,67	13,42
8	Бердский залив, Речкуновка	11,78	10,44	10,17
9	Бердский залив, Агролес	82,35	15,98	59,50
10	Боровое – Быстровка, правый берег	7,81	10,58	9,63
11	Боровое – Быстровка, середина	8,70	9,15	13,83
12	Боровое – Быстровка, левый берег	10,62	11,54	9,45

Таблииа	1. Ланные	по концентрации	хлорофилла а	$(M\Gamma/M^3)$
1 aostatya 1	г. данные	по концентрации	mopophini u	(111/11)

Из *табл. 1* видно, что величина концентрации хлорофилла *а* в точке № 9 (Бердский залив, Агролес) в несколько раз превышает все прочие. Это приведёт к завышению коэффициента корреляции, что необходимо учитывать при дальнейшем анализе результатов.

Анализ результатов

Итоговые карты концентрации хлорофилла *a*, рассчитанные по двум разным алгоритмам, представлены на *puc. 3* (белые участки — острова, облака и тени от них).



Рис. 3. Концентрация хлорофилла *а* в поверхностном слое водохранилища, рассчитанная по данным MSI (Sentinel-2) при помощи алгоритмов: *a* – C2RCC; *б* – C2X

Для сравнения полученных значений концентрации хлорофилла *a* с данными экспедиционных измерений рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона (*R*) и корень из среднеквадратической ошибки (*RMSE*). В *табл. 2* приведены результаты для обоих алгоритмов, полученные при использовании всех точек для расчёта и после исключения точки № 9.

Алгоритм	R		RMSE	
	по всем точкам	после удаления выброса	по всем точкам	после удаления выброса
MSI _{C2RCC}	0,86	0,32	19,58	4,23
MSI _{C2X}	0,99	0,77	7,15	2,87

Таблица 2. Показатели сравнения спутниковых и наземных данных

Так как наличие выброса в районе Бердского залива сильно завышает значения R и RMSE, то основными результатами будем считать показатели, полученные после его исключения. Таким образом, данные, полученные по алгоритму C2RCC, практически не согласуются с наземными измерениями (R = 0,32), а результаты работы алгоритма C2X показывают наличие сильной статистической связи с экспедиционными замерами (R = 0,77). По этой причине для последующего анализа использовались только данные, полученные при помощи алгоритма C2X.

Далее были рассчитаны главные характеристики распределения величины концентрации хлорофилла *а* для основной части водоёма без учёта Бердского залива: по данным *in situ*, по спутниковым данным, полученным в тех же точках, и по спутниковым данным с использованием всей площади водоёма (*maбл. 3*).

	in situ	MSI _{C2X} (по точкам)	MSI _{C2X} (по площади)
1-й квартиль	9,29	9,90	10,79
3-й квартиль	14,91	13,96	13,90
Медиана	11,61	11,17	12,27
Минимальное	6,99	8,16	0,00
Максимальное	22,07	15,45	42,39

Таблица 3. Основные характеристики распределения величины концентрации хлорофилла а

Надо отметить, что максимальные значения концентрации (более 30 мг/m^3) для основной части водохранилища по спутниковым данным были зафиксированы в его верхней части, в районе с. Чингис, где экспедиционных замеров не проводилось. Наличие дамбы между островной и береговой частью села способствует процессу эвтрофикации, чем, вероятно, и обусловлены высокие значения концентрации хлорофилла *а* в этой части водоёма.

Заключение

В ходе исследования были получены карты концентрации хлорофилла *а* в поверхностном слое Новосибирского водохранилища по данным прибора MSI (Sentinel-2) с использованием двух нейросетевых алгоритмов: C2RCC и C2X. При сравнении модельных и натурных данных была исключена одна точка (Бердский залив, Агролес), так как нетипично высокое значение концентрации хлорофилла *а* (82,35 мг/м³) искусственно завышает коэффициент корреляции. Анализ результатов выявил наличие согласия расчётной концентрации с экспедиционными замерами только для алгоритма C2X (R = 0,77; RMSE = 2,87 мг/м³).

Величина *RMSE* для алгоритма C2X составила 13 % от максимального значения концентрации по данным *in situ*, 19 % — по точечным спутниковым данным и 7 % — по спутниковым данным всей площади основной части водохранилища (без учёта Бердского залива).

На карте распределения хлорофилла *a*, полученной по спутниковым данным, хорошо выделяются зоны с экстремально высокими значениями концентрации: Бердский залив и пролив, перекрытый дамбой в районе с. Чингис. Высокие значения концентрации хлорофилла *a* в Бердском заливе подтверждаются натурными данными. В верхней части водохранилища близ с. Чингис экспедиционные замеры не выполнялись.

Таким образом, использование данных прибора MSI для определения концентрации хлорофилла *а* в поверхностном слое водохранилища позволяет получить более полную картину экологического состояния водоёма, нежели отдельные точечные замеры. Кроме того, спутниковые данные могут стать основой для планирования наземных экспедиций. Основными проблемами получения более достоверных результатов являются быстрая изменчивость характеристик поверхностных вод из-за течений, сложность проведения подспутниковых измерений, а также небольшая точность атмосферной коррекции данных MSI, связанная с низким спектральным разрешением сканера и малым числом спектральных каналов.

Литература

- 1. Буканова Т. В. Тенденции эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным: дис. ... канд. геогр. наук. Калининград, 2014. 142 с.
- Ермолаева Н. И., Двуреченская С. Я. Изучение качества воды на отдельных участках новосибирского водохранилища с повышенной экологической напряженностью (на примере Бердского залива) // Состояние и проблемы экологической безопасности Новосибирского водохранилища: сб. тез. конф. Новосибирск, 2012. С. 25–26.
- Савкин В. М., Двуреченская С. Я., Ермолаева Н. И., Киприянова Л. М., Кириллов В. В., Романов Р. Е., Попов П. А., Шлычков В. А., Яныгина Л. В., Атавин А. А., Булычева Т. М., Визе А. М., Горгуленко В. В., Гранкина Т. Б., Дьяченко А. В., Жердева Т. В., Зарубин Е. Ю., Ким Г. В., Ковалевская Н. М., Ковешников М. И., Кондакова О. В., Котовщиков А. В., Крылова Е. Н., Ларикова Н. В., Овчинникова Т. Э., Рыбкина И. Д., Семчуков А. Н., Соколов М. И., Стоящева Н. В., Федорова Е. А., Хабидов А. Ш., Эйрих А. Н. Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища / отв. ред. О. Ф. Васильев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. 383 с.
- 4. *Суторихин И.А., Литвиненко С.А.* Спектральная прозрачность Новосибирского водохранилища в летний период 2017 г. // Естеств. и техн. науки. 2017. № 12. С. 175–177.
- 5. *Ansper A., Alikas K.* Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes // Remote Sensing. 2019. V. 11. Iss. 1. P. 64.
- 6. Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Stelzer K., Embacher S., Ruescas A. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters // Proc. Living Planet Symp. 2016. ESA-SP. V. 740. P. 54.
- 7. Ogashawara I., Mishra D. R., Gitelson A. A., Remote sensing of inland waters // Bio-optical modeling and remote sensing of inland waters. Amsterdam: Elsevier, 2017. P. 3–5.
- 8. *O'Reilly J. E., Werdell P.J.* Chlorophyll algorithms for ocean color sensors OC4, OC5 and OC6 // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 229. P. 32–47.

Using satellite MSI data (Sentinel-2) to estimate the concentration of chlorophyll *a* in the Novosibirsk Reservoir

A.E. Voronova

Siberian Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta" Novosibirsk 630099, Russia E-mail: 35voran@gmail.com

The paper investigates the possibility of using the data of the MSI instrument (Sentinel-2) for mapping the concentration of chlorophyll a in the surface layer of internal freshwater bodies using the example

of the Novosibirsk Reservoir. The concentration calculation was carried out with the SNAP software using standard neural network algorithms C2RCC and C2X. The obtained values were compared with field data. An analysis of the results showed good agreement between the *in situ* data and the calculated chlorophyll concentrations only for the C2X algorithm: the correlation coefficient is 0.77, and the root mean square error is 2.87 mg/m^3 . The nature of the distribution of chlorophyll *a* in the surface layer of the reservoir is also consistent with the findings of previous studies that the concentrations or chlorophyll *a*, obtained from satellite data, zones with extremely high concentrations are clearly distinguished: the Berdskiy Bay and Strait, blocked by a dam, in the area of the Chingis village. High concentrations of chlorophyll in the Berdskiy Bay are confirmed by field data. In the upper part of the Reservoir near the Chingis village, expeditionary measurements were not performed. MSI satellite data can serve as the basis for planning ground-based expeditions, since they allow obtaining maps of the characteristics of the entire water body and identifying zones with the maximum concentration of chlorophyll *a*.

Keywords: chlorophyll, MSI, Sentinel-2, eutrophication, reservoir, water, pond

Accepted: 19.03.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-199-205

References

- 1. Bukanova T.V., *Tendentsii evtrofirovaniya yugo-vostochnoi chasti Baltiiskogo morya po sputnikovym dannym: Diss. kand. geogr. nauk* (Satellite eutrophication trends in the southeastern Baltic Sea. Cand. geogr. sci. thesis), Kaliningrad, 2014, 142 p.
- Ermolaeva N. I., Dvurechenskaya S. Ya., Izuchenie kachestva vody na otdel'nykh uchastkakh novosibirskogo vodokhranilishcha s povyshennoi ekologicheskoi napryazhennost'yu (na primere Berdskogo zaliva) (The study of water quality in certain sections of the Novosibirsk reservoir with increased environmental stress (for example, Berdskiy Bay)), *Sostoyanie i problemy ekologicheskoi bezopasnosti Novosibirskogo vodokhranilishcha* (State and Problems of Environmental Safety of the Novosibirsk Reservoir), Book of Abstracts, Novosibirsk, 2012, pp. 25–26.
- 3. Savkin V. M., Dvurechenskaya S. Ya., Ermolaeva N. I., Kipriyanova L. M., Kirillov V. V., Romanov R. E., Popov P. A., Shlychkov V. A., Yanygina L. V., Atavin A. A., Bulycheva T. M., Vize A. M., Gorgulenko V. V., Grankina T. B., D'yachenko A. V., Zherdeva T. V., Zarubina E. Yu., Kim G. V., Kovalevskaya N. M., Koveshnikov M. I., Kondakova O. V., Kotovshchikov A. V., Krylova E. N., Larikova N. V., Ovchinnikova T. E., Rybkina I. D., Semchukov A. N., Sokolov M. I., Stoyashcheva N. V., Fedorova E. A., Khabidov A. Sh., Eirikh A. N., *Mnogoletnyaya dinamika vodno-ekologicheskogo rezhima Novosibirskogo vodokhranilishcha* (Long-term dynamics of the water-ecological regime of the Novosibirsk reservoir), Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2014, 383 p.
- 4. Sutorikhin I.A., Litvinenko S.A., Spektral'naya prozrachnost' Novosibirskogo vodokhranilishcha v letnii period 2017 g. (Spectral transparency of the Novosibirsk reservoir in the summer of 2017), *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2017, No. 12, pp. 175–177.
- 5. Ansper A., Alikas K., Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Issue 1, p. 64.
- 6. Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Stelzer K., Embacher S., Ruescas A., Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters, *Proc. Living Planet Symp.*, 2016, ESA-SP, Vol. 740, p. 54.
- 7. Ogashawara I., Mishra D. R., Gitelson A. A., Remote sensing of inland waters, In: *Bio-optical modeling and remote sensing of inland waters*, Amsterdam: Elsevier, 2017, pp. 3–5.
- 8. O'Reilly J. E., Werdell P. J., Chlorophyll algorithms for ocean color sensors OC4, OC5 and OC6, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 229, pp. 32–47.