DOI: 10.37102/24094609.2020.32.2.006

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ПО ЦВЕТУ МОРЯ В АМУРСКОМ ЗАЛИВЕ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

П.А. Салюк¹, И.Е. Степочкин¹, С.П. Захарков¹, Е.С. Игнатьева², Д.А. Яковлева³, А.И. Шупило³, В.А. Качур⁴, И.Г. Нагорный⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН¹ Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена»² Санкт-Петербургский государственный университет³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН⁴

Амурский залив испытывает значительную антропогенную нагрузку, поэтому важным является организация многоуровнего мониторинга для осуществления оперативного экологического контроля. Цель данной работы заключается в проведении экспериментальных исследований, ориентированных на решение следующих задач:

• определение оценок эффективности спутникового зондирования цвета моря в оптически сложных водах морских акваторий,

• проведение подспутниковых подводных экспериментов и определение глубины слоев, значимо влияющих на формирование оптического сигнала, регистрируемого из космоса.

Для решения поставленных задач проведено два океанографических разреза, на которых выполнены вертикальные измерения биооптических и гидрологических параметров в морской толще. С этой целью были проанализированы спутниковые изображения радиометров MODIS-Aqua, MODIS-Terra, VIIRS-NPP с применением алгоритмов атмосферной коррекции NIR и MUMM, а также биооптического алгоритма OC-3. Показано, что в водах залива в августе цвет моря формируется в основном в верхнем 10-метровом слое, который подвержен речному стоку и содержит большое количество растворенных и взвешенных веществ. Влияние дна и придонных макроводорослей не должно проявляться на глубинах более 15 метров. Для корректного применения спутниковых данных строго обязательно использование алгоритма MUMM и рекомендуется организация автоматизированной сети подспутниковых наблюдений.

введение

Амурский залив расположен в заливе Петра Великого в Японском море (рис. 1). Его воды испытывают значительную антропогенную нагрузку за счет стока реки Раздольная, сброса сточных вод (в том числе неочищенных) г. Владивосток, активного малого и крупного судоходства, осуществления бункеровки, существенной рекреационной деятельности на побережье. Ситуация усугубляется сезонным формированием гипоксии в придонных водах за счет микробиологического окисления «избыточной» биомассы диатомовых водорослей, оседающих на дно в условиях слабой динамики вод и при низкой интенсивности фотосинтетически активной радиации [1]. Также в заливе могут наблюдаться вредоносные цветения водорослей [2], детектируются разливы нефтепродуктов [3]. Для экологического контроля состояния залива необходимо проведение регулярного многоуровневого мониторинга [4], сочетающего методы контактных распределенных подводных измерений [5], наземных дистанционных измерений [6] и спутникового зондирования [7]. Одним из наиболее эффективных инструментальных методов является спутниковое измерение цвета моря, что позволяет исследовать распределение оптически активных компонентов морской воды (далее – ОАК), значимо влияющих на

¹ 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: + 7 (423) 231-14-00. E-mail: pavel.salyuk@gmail.com

²199034, г. Санкт-Петербург, 14-я Линия В.О., 7. Тел.: +7 (812) 324-51-03. E-mail: adm@niersc.spb.ru

³199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9. Тел.: +7 (812) 363-66-36.

⁴690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5. Тел.: +7 (423) 231-04-39.

распространение света в морской толще. Основными ОАК являются клетки фитопланктона (за счет поглощения света пигментами, в основном хлорофиллом-а (хл.-а), и за счет рассеяния света), растворенные органические вещества (далее – POB, за счет поглощения света) и взвешенные вещества (далее – ВВ, за счет рассеяния света) [8]. Изучение данных компонентов позволяет судить о множестве гидрологических [9] и биогеофизических процессов [10], происходящих в верхних слоях моря, до которых доходит не менее 10% от света, падающего на морскую поверхность.

Основными преимуществами спутникового зондирования является возможность совмещения одномоментных измерений на синоптических масштабах и регулярных измерений над одной и той же акваторией. На рис. 1 приведен пример космического RGB-изображения, полученного радиометром Landsat-8 с разрешением 30 метров на один пиксель. Отчетливо видны следы выхода реки Раздольной за счет распределения органических веществ.

К главным недостаткам при спутниковом зондировании поверхности моря в оптическом диапазоне относятся:

• невозможность получения данных при наличии облаков;

• сильная зависимость регистрируемого сигнала цвета моря от изменчивости состояния атмосферы в ясную погоду [11];

• непостоянность соотношений между вкладом ОАК в цвет моря как за счет разных периодов развития фитопланктонных сообществ и разных объемов речного стока [12], так и за счет разной стратификации ОАК в слое, видимом для оптического спутникового зондирования [13].

Поэтому для практического использования спутниковых данных рекомендуется проведение регулярных подспутниковых измерений, желательно с помощью автоматизированных распределенных систем [14].

Важной является правильная интерпретация спутниковых данных о цвете моря, чтобы отделить инструментальные и природные факторы, формирующие сигнал, распознать проявление атмосферных процессов на данных о цвете моря, правильно разделить или учесть различный вклад ОАК в цвет моря за счет смены типов вод или при изменении стратификации вод.

Особенно внимательно необходимо подходить к спутниковым данным для оптически сложных вод [8], где присутствует большое количество BB, что приводит к сбоям алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых данных, наблюдается существенное поступление POB, не связанных с жизнедеятельностью клеток фитопланктона, и наблюдаются существенные вариации в соотношениях между концентрациями POB и хлорофилла-а.

Именно к таким водам относятся воды Амурского залива [15], в котором дополнительным фактором,



Рис. 1. Район исследований – Амурский залив: пример спутникового RGB-изображения высокого разрешения (30 метров), полученного с радиометра Landsat-8 (слева); карта расположения океанографических разрезов (справа), цифрами вдоль траекторий обозначены номера станций

который может отрицательно воздействовать на результаты спутникового зондирования, является возможное влияние отраженных сигналов от дна [16] и полей придонных макроводорослей [17].

Цель, задачи, материалы и методы исследований

Как уже было отмечено выше, цель проводимых исследований заключается в выявлении механизмов формирования цвета моря в Амурском заливе в морской толще и в проверке возможностей оптического спутникового зондирования для изучения биооптических характеристик залива. Для этого были определены следующие задачи: проведение подспутниковых измерений вертикального распределения биооптических и гидрологических параметров вдоль двух разрезов в Амурском заливе 17 августа (разрез 1) и 19 августа (разрез 2) 2018 г., географическое положение которых показано на рис. 1. Накопление и анализ массива спутниковых данных со сканеров цвета моря с ежедневным покрытием над исследуемой акваторией: VIIRS-NPP, MODIS-Aqua, MODIS-Terra.

Подспутниковые исследования включали в себя судовые и лабораторные измерения контактными методами основных оптически активных компонентов, связанных с окрашиванием морской воды. С помощью гидрологического профилографа SeaBird SBE 19plus V2 были осуществлены измерения глубинных профилей температуры, электропроводности и давления с помощью встроенных датчиков, мутности и концентрации хлорофилла-а вспомогательными датчиками Seapoint и концентрации отравляющих вещест (POB) с помощью датчика WetLabs. Также проводился отбор проб на определение концентрации хлорофилла-а по ГОСТ, коэффициентов поглощения света РОВ и массы вредных веществ (ВВ). Каждая отобранная проба подвергалась фильтрации с использованием мембранных фильтров с порами 0,4 мкм. Натурные работы проведены на моторной лодке RIB-450, использование которой позволяло оперативно планировать выходы в море в ясную погоду и обеспечивало низкую себестоимость исследований.

При проведении исследований были использованы спутниковые измерения оптических радиометров MODIS-Aqua, MODIS-Terra и VIIRS-NPP второго уровня L2. Данные получены с интернет-портала Ocean Color Web (oceancolor.gsfc.nasa.gov), где они были обработаны с атмосферной коррекцией по алгоритму Near-infrared (NIR). Кроме того, использовались данные с сайта Центра спутникового мониторинга ДВО РАН [18], где осуществляется потоковая обработка данных MODIS-Aqua и MODIS-Terra для залива Петра Великого с применением алгоритма атмосферной коррекции The Management Unit of the North Sea Mathematical Models (MUMM), адаптированного для залива Петра Великого [11, 19], и с использованием спектральных каналов радиометров семейства MODIS с пространственным разрешением 250 м для оценки содержания ВВ. Это позволяет получить интерполированные данные по цвету моря для акватории Амурского залива с пространственным разрешением 250 м на пиксель. Концентрация хлорофилла-а в обоих источниках данных оценивалась с помощью стандартного биооптического алгоритма OC-3 [20].

• Результаты исследований

Материалы, полученные при выполнении вертикального профилирования водной толши Амурского залива, показаны на рис. 2, 3. Выявлено, что наибольшие концентрации РОВ наблюдаются в верхнем 8-метровом слое и соответствуют наиболее прогретой воде с наименьшими концентрациями солей и плотностью и высокой мутностью, что может свидетельствовать об их речном происхождении. Распределение концентрации хлорофилла-а имеет два слоя с наибольшими значениями: верхний до 3-5 м и придонный. Виден приход вод, более богатых хлорофилла-а, через пролив Босфор Восточный (станции 4, 12, 13).

По диаграмме рассеяния хлорофилла-а и РОВ выделяются два разных оптических типа вод в слоях 0–10 (2-й тип вод) и 10–25 м (1-й тип вод) (рис. 4). В слое 0–10 м наблюдается высокое содержание РОВ, которое имеет отрицательную корреляцию с соленостью, что говорит о существенном вкладе веществ терригенного происхождения. В слое 10–25 м содержание РОВ относительно мало и может быть функционально связано с концентрацией хлорофилла-а, и, таким образом, данные воды возможно отнести к первому оптическому типу [21].

На основе данных о связи коэффициентов ослабления света и содержания хл.-а и РОВ в водах залива Петра Великого была произведена оценка вклада каждого из выделенных слоев в формирование цвета морской поверхности для измеренных значений хлорофилла-а и РОВ. Получено, что 95–97% вариаций цвета моря, регистрируемого дистанционно, без учета атмосферы, связаны с вертикальным распределением ОАК в верхнем 10-метровом слое и 3–5% определяются изменчивостью в слое 10–15м. Оптические характеристики вод глубже 15 м не вли-

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Рис. 2. Поперечные разрезы: концентрации РОВ, солености, концентрации хлорофилла-а, мутности в Амурском заливе за 17 августа 2018 г. Цифрами сверху показаны номера станций



Рис. 3. Поперечные разрезы: температуры, солености, концентрации хлорофилла-а, мутности в Амурском заливе за 19 августа 2018 г. Цифрами сверху показаны номера станций



Рис. 4. Диаграммы рассеяния «хл.-а – РОВ» и «соленость – РОВ» за 17 августа 2018 г

яли на формирование цвета моря, как и отраженное от дна или придонных макроводорослей излучение. Соответствующие границы показаны пунктирными линиями на рис. 2, 3.

На рис. 5 показаны пространственные распределения спутниковых оценок концентрации хл.-а C_{SAT} за 19 августа 2018 г, полученные с применением алгоритма атмосферной коррекции NIR и биооптического алгоритма ОС-3. Обращает на себя внимание большая неоднородность в полученных значениях. Например, в районе между широтами 43°N и 43°N6' различие в оценках C_{SAT} с разных радиометров достигает десяти раз: около 30 мкг/л для MODIS-Aqua и

VIIRS-NPP (в 13:14:54) и около 3 мкг/л для MODIS-Тегта и VIIRS-NPP (в 14:55:19). Причем такая разница наблюдается даже для одного сканера VIIRS-NPP, снимки которого получены с интервалом в полтора часа, что не может быть объяснено океанологическими причинами. Основная причина наблюдаемых несоответствий заключается в неправильной работе алгоритмов атмосферной коррекции над водами Амурского залива, богатыми BB в верхнем слое.

На рис. 6 показаны пространственные распределения спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а С_{SAT} за 19 августа 2018 г, полученные с применением алгоритма атмосферной коррекции MUMM



Рис. 5. Оценки концентрации хлорофилла-а С_{зат} различными спутниковыми сканерами за 19.08.2018, полученные с помощью алгоритма атмосферной коррекции NIR и биооптического алгоритма OC-3 с портала Ocean Color Web oceancolor.gsfc.nasa.gov. Приведено время измерений в UTC



Рис. 6. Оценки концентрации хл.-а С_{SAT} различными спутниковыми сканерами за 19.08.2018, полученные с помощью алгоритма атмосферной коррекции МUMM и биооптического алгоритма ОС-3 с портала Центра спутникового мониторинга ДВО РАН. Приведено время измерений в UTC

и биооптического алгоритма ОС-3. Метод «МИММ Interp» соответствует использованию спектрального канала 841-876 нм с физическим разрешением 250 м и данных из видимого диапазона, интерполированных с 1 км на 250-метровое разрешение. Разница в пространственном разрешении представленных данных MODIS-Aqua и MODIS-Terra связана с тем, что 19 августа 2018 г. район исследований находился в центре полосы сканирования MODIS-Aqua и на краю полосы сканирования MODIS-Terra. Видно, что использование алгоритма атмосферной коррекции МUMM позволило исключить грубые ошибки в оценке концентрации хлорофилла-а, однако несоответствия между различными радиометрами остаются. Для дальнейшего улучшения данных необходимы модификация биооптических алгоритмов и создание систем автоматизированного подспутникового мониторинга.

Для того чтобы сравнить разные алгоритмы атмосферной коррекции NIR и MUMM, было проведено сопоставление между оптически-взвешенными [13] концентрациями хлорофилла-а (C_{CTD}), измеренными с помощью профилографа SBE-19 plus, и индексами цвета моря [12] (R_{SAT}), рассчитанными из спутниковых измерений коэффициентов яркости моря *Rrs* на длинах волн 488 и 555 нм (рис. 7):

$$R_{SAT} = \log_{10} \left(\frac{Rrs}{488} \right) / \frac{Rrs}{555}$$

Сравниваемые величины должны иметь значимую обратную корреляцию, однако на рис. 7, *а* видно, что при использовании стандартной обработки спутниковых данных с атмосферной коррекцией NIR наблюдается облако точек. В то время как на рис. 7, б при использовании атмосферной коррекции MUMM только одна точка выпадает из обратной зависимости. Причина данного выброса, скорее всего, связана уже не с атмосферной коррекцией, а с процессами распространения света в морской толще или с инструментальными ошибками подспутниковых измерений.

выводы

На всей акватории Амурского залива строго обязательно применение атмосферной коррекции спутниковых данных о цвете моря по алгоритму МUMM. Спутниковые данные корректны при глубинах от 15 м и больше. Основной вклад в формирование цвета поверхности оказывают ОАК до 8-10 м от поверхности в слое, содержащем большое количество РОВ и ВВ терригенного происхождения. Необходимы разработка сезонных биооптических алгоритмов для оценки содержания ОАК в различные сезоны и создание систем автоматизированных подспутниковых измерений как параметров атмосферы и морской поверхности для улучшения работы алгоритмов атмосферной коррекции и учета морского волнения, так и биооптических параметров морской толщи для улучшения работы биооптических алгоритмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Дальний Восток» (проект № 18-01-10 и № 18-01-04) и в рамках госбюджетной темы № АААА-А17-117030110037-8.





ЛИТЕРАТУРА

1. Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Звалинский В.И., Сергеев А.Ф., Волкова Т.И., Колтунов А.М., Михайлик Т.А., Сагалаев С.Г., Тищенко П.П., Швецова М.Г. Сезонная гипоксия Амурского залива (Японское море) // Изв. ТИНРО. 2011. Т. 165. С. 136–157.

2. Vershinin A.O., Orlova T.Yu. Toxic and harmful algae in the coastal waters of Russia // Oceanology. 2008. Vol. 48, No. 4. P. 524–537.

3. Bukin O.A., Proschenko D.Y., Chekhlenok A.A., Korovetskiy D.A. Methods for optical monitoring of oil pollution of sea water basins using unmanned aerial vehicles // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. Vol. 32, No. 4. P. 459–463.

4. Kul'chin Yu.N., Bukin O.A., Konstantinov O.G., Voznesenskii S.S., Pavlov A.N., Gamayunov E.L., Mayor A.Yu., Stolyarchuk S.Yu., Korotenko A.A., Popik A.Yu. Complex Monitoring of the State of Sea Water Basins by Optical Methods. Part 1. The Concept of Constructing the Multilevel Measurement Systems for Ecological Monitoring of Coastal Water Basins // Atmospheric and Oceanic Optics. 2012. Vol. 25, No. 6. P. 446–450.

5. Фищенко В.К., Зимин П.С., Зацерковный А.В., Суботэ А.Е., Голик А.В., Гончарова А.А. Системы стационарного подводного видеонаблюдения прибрежных акваторий // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 1 (31). С. 60–71.

6. Konstantinov O.G., Novotryasov V.V. Surface manifestations of internal waves observed using a land-based video system // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. Vol. 49, No. 3. P. 334–338.

7. Дубина В.А., Фищенко В.К., Константинов О.Г., Митник Л.М. Интеграция спутниковых данных и наземных видеонаблюдений в системах мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 214–220.

8. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters. Vol. 3 of Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group / Ed. by Sathyendranat S. Dartmouth, Canada: IOCCG, 2000. 140p.

9. Навроцкий В.В., Дубина В.А., Павлова Е.П., Храпченков Ф.Ф. Анализ спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла в Заливе Петра Великого (Японское море) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 1. С. 158–170.

10. Shtraikhert E.A., Zakharkov S.P. On the spatial-temporal variations in the chlorophyll-a concentration on the Peter the Great Bay shelf during the winter-spring phytoplankton bloom according to satellite and subsatellite data // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52, Is. 9. P. 999–1011.

11. Aleksanin A.I., Kachur V.A. Specificity of atmospheric correction of satellite data on ocean color in the Far East // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. Vol. 53, No. 9. P. 996–1006.

12. Салюк П.А., Степочкин И.Е., Голик И.А., Букин О.А., Павлов А.Н., Алексанин А.И. Разработка эмпирических алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ для дальневосточных морей из дистанционных данных по цвету водной поверхности // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 45–57.

13. Salyuk P.A., Shambarova J.V., Stepochkin I.E., Bukin O.A., Sokolova E.B., Mayor A.Y., Gorbushkin A.R. Determination of the chlorophyll-a concentration by MODIS-Aqua and VIIRS satellite radiometers in Eastern Arctic and Bering sea // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52, No. 9. P. 988–998.

14. Крикун В.А., Коротенко А.А., Салюк П.А. Многоцелевой автономный модуль для сетевых подводных измерений биооптических параметров морской воды // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 3 (29). С. 61–67.

15. Salyuk P., Krikun V., Bukin O., Alexanin A., Pavlov A., Mayor A., Shmirko K., Akmaykin D. Optical properties of Peter the Great Bay waters compared with satellite ocean colour data // Int. Journ. of Remote Sensing. 2010. Vol. 31, No. 17. P. 4651–4664.

16. Mobley C.D., Zhang H., Voss K.J. Effects of optically shallow bottoms on upwelling radiances: Bidirectional reflectance distribution function effects // Limnology and Oceanography. 2003. Vol. 48, No. 1. P. 337–345.

17. Zharikov V.V., Bazarov K.Y., Egidarev E.G., Lebedev A.M. Application of Landsat data for mapping higher aquatic vegetation of the Far East Marine Reserve // Oceanology. 2018. Vol. 58, No. 3. P. 487–496.

18. Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Бабяк П.В., Дьяков С.Е., Загуменнов А.А., Еременко А.С., Еременко В.С., Катаманов С.Н., Ким В., Качур В.А., Недолужко И.В., Фомин Е.В. Технологические возможности спутникового центра ДВО РАН // Вестн. ДВО РАН. 2016. № 4 (188). С. 142–150.

19. Ruddick K.G., Ovidio F., Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters // Applied Optics. 2000. Vol. 39, No. 6. P. 897–912.

20. O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Garver S.A., Kahru M., McClain C. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // Journ. Geophys. Res-Oceans. 1998. Vol. 103. P. 24937–24953.

21. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color // Limnology and Oceanology. 1977. Vol. 22. P. 709–722.

