

Использование данных спутникового сканера *MSI Sentinel-2* для оценки антропогенной нагрузки на прибрежные районы Крымского побережья в 2017–2019 гг

Т.Я. Шульга¹, Л.В. Вержевская¹, А.В. Медведева¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, Капитанская 2, Севастополь, Россия, 299011

Аннотация. В работе обсуждается пространственное распространение областей загрязнений в юго-западной части Крымского побережья Черного моря по данным спутниковых измерений сканера *MSI Sentinel-2* в 2017–2019 гг. Исследуются пространственная и временная эволюция и ветровой перенос загрязненных вод, а также их вклад в антропогенную нагрузку прибрежных районов. Данные спутниковых наблюдений сравниваются со среднемноголетними данными по концентрации взвешенных веществ за период с 1998 по 2018 гг. В результате анализа данных дистанционного зондирования выявляются области наибольших значений биооптических индексов, согласующихся с расположением устьев рек и выпусков коммунальных стоков.

1. Введение

Черное море, являющееся внутренним бассейном, отличается большой степенью зависимости от окружающего водосборного бассейна площадью 2 млн. км², который охватывает территории 20 государств Европы и Малой Азии. Наиболее заметно влияние материковых вод в районе северо-западного шельфа Черного моря, где впадают реки Дунай, Днестр, Днепр и Южный Буг общей водосборной площадью 1,46 млн. км² [1]. Расположенные здесь города и промышленные центры являются причиной интенсивного антропогенного давления, обусловленного поступлением в море последствий материальной деятельности людей с жидкими стоками, твердыми отходами и атмосферными осадками. Оценки уровня антропогенных нагрузок в результате хозяйственного освоения Черноморского побережья предложены в [2, 3], современное экологическое состояние водозаборов подземных вод Крыма, крымских рек и прилегающих морских акваторий исследовано в [4]. В настоящей работе исследуются пространственная и временная эволюция загрязненных вод на основании анализа данных дистанционного зондирования.

2. Используемые данные и подходы

2.1. Район исследования

В качестве района исследования рассматривается участок северо-западного шельфа Черного моря, расположенный в юго-западной части Крымского побережья и прилегающий к береговой

зоне субъекта РФ города Севастополя. Исследуемый район включает побережье Севастопольского региона и участки вдоль Гераклейского полуострова, расположенные от Евпаторийского мыса на севере, огибающие Каламитский залив, и часть южного берега Крыма до Фороса на юге (рис. 1). К северу от Гераклейского полуострова в Черное море впадают реки Кача, Бельбек, Альма и Черная, с которыми поступают основные загрязняющие вещества. Кроме того, по всему исследуемому побережью имеются выходы муниципальных коллекторов централизованного водоотведения. Исследуемая прибрежная зона испытывает антропогенную нагрузку от многочисленных несанкционированных сбросов нелегальных мест туристического размещения. Рекреационная важность региона подчеркивает актуальность выбора указанного района исследования.

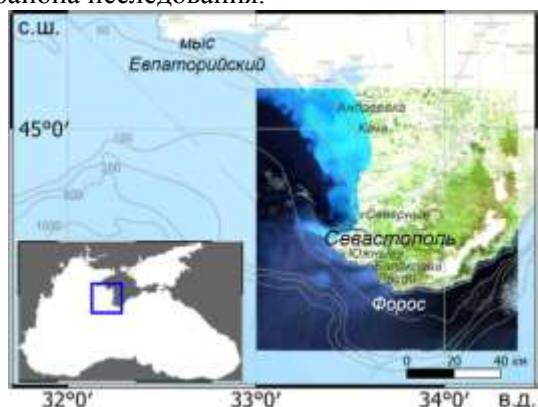


Рисунок 1. Батиметрия исследуемого района, объединенная с изображением морской поверхности со спутника Sentinel-2 27.04.2017, и его географическое положение в бассейне Черного моря (синий прямоугольнике слева на вкладке). Светло-серые контуры представляют изобаты, разнесенные от 20 до 1000 м.

2.2. Данные контактных измерений за 1998–2018 гг.

В целях получения репрезентативной информации об уровне антропогенной нагрузки использовались сводные данные Главного управления природных ресурсов и экологии г. Севастополя. За основу принята усредненная статистика по концентрации взвешенных веществ в период с 1998 по 2018 гг. Подбор определенных параметрически связанных между собой показателей, таких как уровень среднегодового стока, объем и концентрация загрязняющих веществ в сбрасываемых водах, иные имеющиеся данные о канализационных стоках, дал возможность провести анализ конкретных количественных характеристик пространственного распространения областей загрязнений в исследуемом районе прибрежной зоны Черного моря (рис. 2).

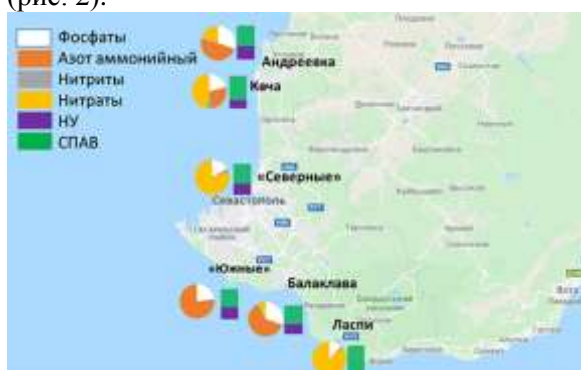


Рисунок 2. Доля концентрации биогенных и загрязняющих веществ в выпусках сточных вод вдоль побережья Севастопольского региона по среднееголетним данным 1998–2018 гг.

2.3. Данные спутниковых наблюдений

Для реализации подхода, основанного на анализе спутниковых изображений, использованы данные оптического сканера MSI Sentinel-2, которые были получены из открытых архивов Европейского космического агентства (ESA), доступных на портале Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Эти данные включают каналы видимого диапазона (490 – 665 нм) с 10-ти метровым пространственным разрешением и ближнего инфракрасного (705 нм) – с 20-ти метровым разрешением. Среди снимков за период 2017–2019 гг. предварительно производилась выборка изображений с отсутствующим и минимальным

облачным покровом над прибрежной зоной, а затем данные подвергались дешифрированию в программе *SNAP Desktop*. В отобранных спутниковых архивах выявление взвешенного вещества осуществлялось путем комбинации каналов: B02 (Blue) – 490 нм, B03 (Green) – 560 нм и B05 (Vegetation red edge) – 705 нм. Затем выполнялось извлечение значений коэффициентов яркости моря (remote sensing reflectance $R_{rs}(\lambda)$) на длине волны λ) для каждого пикселя с переносом их на модельную сетку с использованием приложения *Panoply*.

2.4. Подход к определению биооптических характеристик Черного моря в районе исследования
Данные спутниковых наблюдений преобразованы в пространственные карты распределения биооптических индексов $index34$ и $b_{bp}(555)$ на модельной сетке с разрешением ~ 300 м, охватывающей район шельфа юго-западной части Крымского побережья (<http://www.gebco.net>). Индекс $index34$ характеризует суммарную концентрацию живой и неживой компоненты органического вещества в морской воде [6] и представляет собой отношение коэффициентов яркости моря: $index34 = [R_{rs}(531) \cdot F_o(531)] / [R_{rs}(488) \cdot F_o(488)]$, где $F_o(\lambda)$ – солнечные постоянные для волны длиной λ [2]. Индекс $b_{bp}(555)$ – показатель рассеяния света назад частицами взвеси на длине волны 555 нм: $b_{bp}(555) = \{6,76 \cdot L_{WN}(555) + 0,03 \cdot [L_{WN}(555)]^3 + 3,4 \cdot L_{WN}(555) \cdot [I_{510}]^{3,8} - 0,84\} \cdot 10^{-3}$ (m^{-1}), здесь $L_{WN}(\lambda) = R_{rs}(\lambda) \cdot F_o(\lambda)$ ($мк \cdot Вт \cdot см^{-2} \cdot нм^{-1} \cdot ср^{-1}$) и $I_{510} = L_{WN}(555) / L_{WN}(510)$ [5].

2.4.1. Критерий определения границы области загрязнения по спутниковым данным. Всего было обработано 268 снимков, из них наиболее регулярные данные приходится на период с мая по сентябрь (116 снимков). Определение положения границы области загрязнения по спутниковым данным обусловлено минимальными значениями индексов цвета $index34$ и $b_{bp}(555)$. Критерий определения границы области включает в себя несколько этапов. На первом этапе для всего периода исследования 2017–2019 гг. строились пространственные карты показателей индексов цвета на модельной сетке. На втором этапе устанавливались верхние и нижние границы индексов цвета, поскольку распределение индексов $index34$ и $b_{bp}(555)$ в каждом конкретном случае определяется разными диапазонами. При сопоставлении со спутниковыми изображениями, отражающими случаи наиболее мощных коммунальных и речных стоков, были получены значения верхних границ для индексов $index34 = 9$ и $b_{bp}(555) = 1$ m^{-1} . Верхние границы отвечают реальным максимальным значениям из диапазонов изменения индекса и обусловлены необходимостью корректного отображения данных на картах. Нижние границы одинаковы для всех случаев и определяются как 2,7% и 2,5% относительно значений верхних границ биооптических индексов: $index34 = 0,25$ и $b_{bp}(555) = 0,025$ m^{-1} .

3. Результаты и обсуждение

По спутниковым данным построены карты пространственного распределения индексов цвета $index34$ и $b_{bp}(555)$, обеспечивающие достаточное покрытие акватории исследуемого района Черного моря. В соответствии с разработанными критериями представленные карты показывают области загрязнений в рассматриваемый период времени. На рис. 3 показаны временные срезы распределения $index34$ в момент усвоения данных на модельную сетку на 31.07.2017 (рис. 3, а) и спустя 5 суток 05.08.2017 (рис. 3, б).

Распределения биооптических индексов, формирующиеся к началу летнего сезона и существующие до начала осени, во многих случаях хорошо укладываются в существующие представления [7, 8]. В 2017 и 2019 гг. наблюдается распространение загрязнений к востоку, а в 2018 гг. к западу. Отметим, что в течение сезона направление распространения может меняться. Такая ситуация наблюдалась в 2017 г., когда преобладавшее до середины августа восточное направление транспорта загрязнений сменилось на западное к концу сентября. Кроме того, особенностью 2017 г. была устойчивость положения границы загрязнений в центральной части моря с конца июня по конец июля.

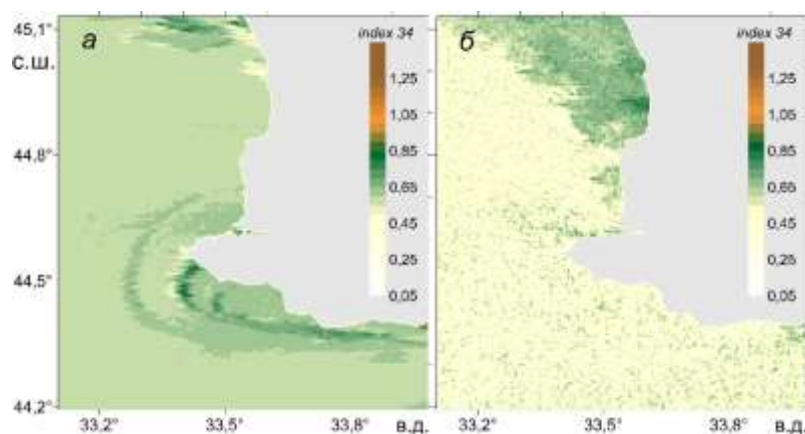


Рисунок 3. Карты распределения *index34* на модельной сетке: (а) – на 31.07.2017, (б) – 05.08.2017.

4. Заключение

Выполнено исследование процесса распространения загрязнений в юго-западной части Крымского побережья в 2017–2019 гг. по данным спутникового сканера цвета *MSI Sentinel-2*. Выполнен анализ изменчивости транспорта взвешенных веществ в исследуемом районе, установлены направления переноса загрязнений в зависимости от ветрового режима над северо-западным шельфом Черного моря. В дальнейших исследованиях предполагается оценить величину смещения границ загрязнений и использовать наряду со спутниковыми снимками результаты трехмерного гидродинамического моделирования и данные измерений *in situ*.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0004 (шифр «Прибрежные исследования»), а также частично при поддержке грантов РФФИ № 17-05-00113 и № 18-05-80025.

6. Литература

- [1] Zaitsev, Yu. Marine Biological Diversity in the Black Sea. A Study of Change and Decline / Yu. Zaitsev, V. Mamaev – New York: UN Publ., 1997. – 208 p.
- [2] Беляев, В.И. Оценка уровня антропогенных нагрузок на прибрежные зоны и экотоны Черноморского побережья Украины / В.И. Беляев, С.И. Дорогунцов, Е.Е. Совга, Т.С. Николаенко // Морской гидрофизический журнал. – 2001. – № 1. – С. 55-63.
- [3] Совга, Е.Е. Экологическое состояние прибрежно-морских районов Крыма / Е.Е. Совга, А.А. Пасынков, О.А. Андреева // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2011. – Т. 25. – С. 169-180.
- [4] Андреева, О.А. Особенности ландшафтно-геохимических условий и экологическое состояние прибрежно-морских территорий Украины / О.А. Андреева // Геополитика и экогеодинамика. – Симферополь: Инф.-изд. отдел ТНУ, 2010. – Т. 6, № 1-2. – С. 77-86.
- [5] Suslin, V. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners / V. Suslin, T. Churilova // International Journal of Remote Sensing. – 2016. – Vol. 37(18). – P. 4380-4400.
- [6] Kopelevich, O.V. Bio-optical characteristics of the Russian seas from satellite ocean color data of 1998-2010 / O.V. Kopelevich, V.I. Burenkov, S.V. Sheberstov, S.V. Vazyulya, S.P. Zavyalov // Proc. VI Int. Conf. Current problems in optics of natural waters. St.-Petersburg, 2011. – P. 181-182.
- [7] Бондур, В.Г. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя / В.Г. Бондур, В.А. Иванов, В.А. Дулов, Ю.Н. Горячкин, В.В. Замшин, С.И. Кондратьев, М.Е.

- Ли, В.С. Муханов, Е.Е. Совга, А.М. Чухарев // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 42-54.
- [8] Грузинов, В.М. Проблемы состояния морской окружающей среды крымского полуострова / В.М. Грузинов, Н.Н. Дьяков, И.В. Мезенцева, Ю.А. Мальченко, Н.В. Жохова // *Труды Государственного океанографического института*. – 2018. – № 219. – С. 124-151.

The use of the data from Sentinel-2's MSI instrument to estimate the anthropogenic load on the coastal areas of the Crimea in 2017–2019

T.Ya. Shul'ga¹, L.V. Verzhetskaya¹, A.V. Medvedeva¹

¹Marine Hydrophysical Institute of RAS, Kapitanskaya 2, Sevastopol, Russia, 299011

Abstract. The paper discusses the spatial distribution of polluted areas in the southwestern part of the Crimean coast of the Black Sea according to satellite measurements from *Sentinel-2 MSI* scanner in 2017–2019. The spatial and temporal evolution and wind transport of polluted water, as well as its contribution to the anthropogenic load of coastal areas, are studied. Satellite observation data are compared with long-term average annual data on the concentration of suspended matter for the period from 1998 to 2018. As a result of the analysis of remote sensing data, the areas with the highest values of biooptical indices are identified, which are consistent with the location of the river mouths and outlets of municipal sewage pipes.