

УДК 551.463

Оценка характеристик различного типа вод в Керченском проливе по результатам судовых дистанционных оптических измерений

В.В. Ростовцева✉, А.С. Ижицкий, Б.В. Коновалов*

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36*

Поступила в редакцию 19.07.2023 г.;

после доработки 6.09.2023 г.;

принята к печати 16.10.2023 г.

Приведены результаты исследования состояния акватории Керченского пролива по данным портативного трехканального гиперспектрометра ЭММА, работающего с борта движущегося судна в течение светового дня с разрешением по направлению движения в несколько метров. По измеренным спектрам коэффициента спектральной яркости моря рассчитаны спектры показателя поглощения света водой в акватории Керченского пролива. Верификация этих данных проведена по результатам измерений глубины видимости диска Секки на станциях. Рассчитанные далее по спектрам суммарного поглощения света водой концентрации трех основных природных компонентов, средние по глубине проникновения света в толщу воды, были сопоставлены с измерениями в пробах, отобранных с поверхности воды по маршруту. Расхождение в этих оценках в некоторых районах говорит о неравномерном по глубине распределении компонентов, что было подтверждено при вертикальном зондировании на станциях; при калибровке результатов дистанционного зондирования данные из этих районов не использовались. Полученные по измерениям трехканальным гиперспектрометром данные дали осредненное по глубине распределение природных компонентов в акватории Керченского пролива, а также позволили получить некоторые характеристики антропогенного воздействия, зафиксированного со спутников.

Ключевые слова: оптическое пассивное дистанционное зондирование, гиперспектрометр, взвесь, фитопланктон, окрашенное органическое вещество, диск Секки, профили температуры и солености вод, антропогенное воздействие; optical passive remote sensing, hyperspectrometer, suspended matter, phytoplankton, colored organic matter, Secchi disk, water temperature and salinity profiles, anthropogenic impact.

Введение

В прибрежных водах, особенно в акваториях вблизи устьев рек, в проливах и крупных портах пассивное оптическое зондирование с борта движущегося судна позволяет оперативно отслеживать изменение состояния вод в прибрежной зоне и дает ценную информацию для интерпретации спутниковых данных [1–3], которые используются при изучении этих районов [4, 5]. На севере Черного моря одним из таких районов является Керченский пролив. По спутниковым снимкам и контактными измерениями можно сделать вывод о сложном характере смешения вод Азовского и Черного морей [6–9]. В отличие от многих других проливов и устьев рек структура течений Керченского пролива характери-

зуется сильной неоднородностью как по вертикали, так и по горизонтали. Ветровая обстановка, местный нагрев и соленость вод определяют здесь направление и скорость течений и, следовательно, влияют на распространение загрязнений [10–13]. Пассивные оптические наблюдения с борта движущегося судна — ценная оперативная информация, однако возникает вопрос, насколько надежно эти данные характеризуют морские воды в условиях сильной неоднородности.

Цель настоящей работы — определение характеристик вод в Керченском проливе комплексными методами с детализацией картины с помощью оптического комплекса ЭММА (Экологический Мониторинг Морских Акваторий). Полученные результаты позволили охарактеризовать процесс смешения вод в проливе, оценить концентрации основных природных компонентов морской воды, а также выявить количественные временные изменения, вызванные антропогенным воздействием, зафиксированным по спутниковым данным.

* Вера Владимировна Ростовцева (vera@ocean.ru); Александр Сергеевич Ижицкий (izh@ocean.ru); Борис Васильевич Коновалов (bvkonovalov@yandex.ru).

Материалы и методы исследования

В течение трех дней мы проводили измерения в Керченском проливе, характеризующемся сложной системой поверхностных и глубинных течений, трехканальным гиперспектрометром ЭММА, установленным на борту движущегося судна. По полученным гиперспектрометром спектрам с помощью специального алгоритма решения обратной задачи, где в качестве регуляризирующих факторов использованы известные показатели поглощения света чистой водой [14, 15], были оценены концентрации трех основных естественных компонентов морской воды (взвесь, пигменты фитопланктона, окрашенное органическое вещество). Одновременно с этим по результатам измерения температуры и солености воды проточной системой при движении судна и вертикального зондирования на станциях определялась принадлежность вод к Азовскому или Черному морям. На станциях также измерялась глубина видимости диска Секки и проводился отбор проб воды. Их дальнейшая обработка показала, какие из этих проб можно использовать для калибровки дистанционных данных.

Результаты и обсуждение

Результаты работы оптического гиперспектрометра ЭММА

Трехканальный пассивный гиперспектрометр ЭММА [16] работал дистанционно с борта движущегося судна в светлое время суток с частотой 1 ПЦ.

В каждом замере получали три спектра — яркости морской поверхности (B_{sea}), яркости отражающегося от поверхности участка неба (B_{sky}) и освещенности морской поверхности, пересчитанной в яркость белого горизонтального диффузного экрана (B_{ws}). На рис. 1 показаны маршруты движения научно-исследовательского судна (НИС) 3–5.09.2019 г. и обозначены станции, где были проведены гидрологические измерения и взяты пробы воды с поверхности.

В качестве примеров данных, получаемых с комплекса ЭММА, приведены спектры яркости в трех каналах, измеренные при пересечении Керченского пролива 4.09.2019 г. от восточного берега к западному в районе станций от 23 до 17 (рис. 2, а).

Величина сигналов общей освещенности зависит в основном от времени суток, а яркость моря и неба — от расположения судна, состояния поверхности моря и состава воды. Совместная обработка этих данных позволяет получить зависимости от длины волны коэффициента спектральной яркости моря R_o (КСЯ), отображающие свойства самой воды без учета освещенности поверхности: $R_o = (B_{\text{sea}} - rB_{\text{sky}})/B_{\text{ws}}$. Видно, что особенности спектров яркости, обусловленные прохождением солнечного света через атмосферу, проявляются на всех трех исходных спектрах (например, провал на 420 нм), однако при переходе к спектру КСЯ они исчезают. При этом особенности, обусловленные самой водой и проявляющиеся, следовательно, только в спектре яркости воды, хорошо видны

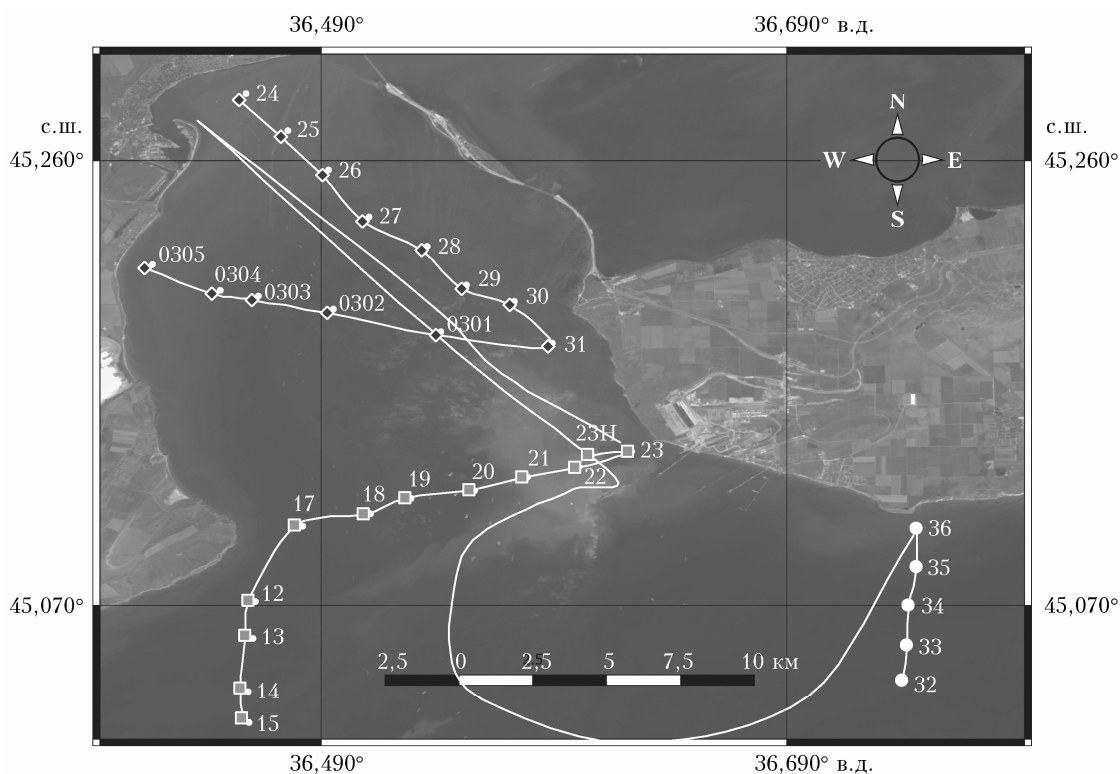


Рис. 1. Маршруты перемещения НИС 3–5.09.2019 г.; ромбами (3.09), квадратами (4.09) и кружками (5.09) с номерами обозначены станции

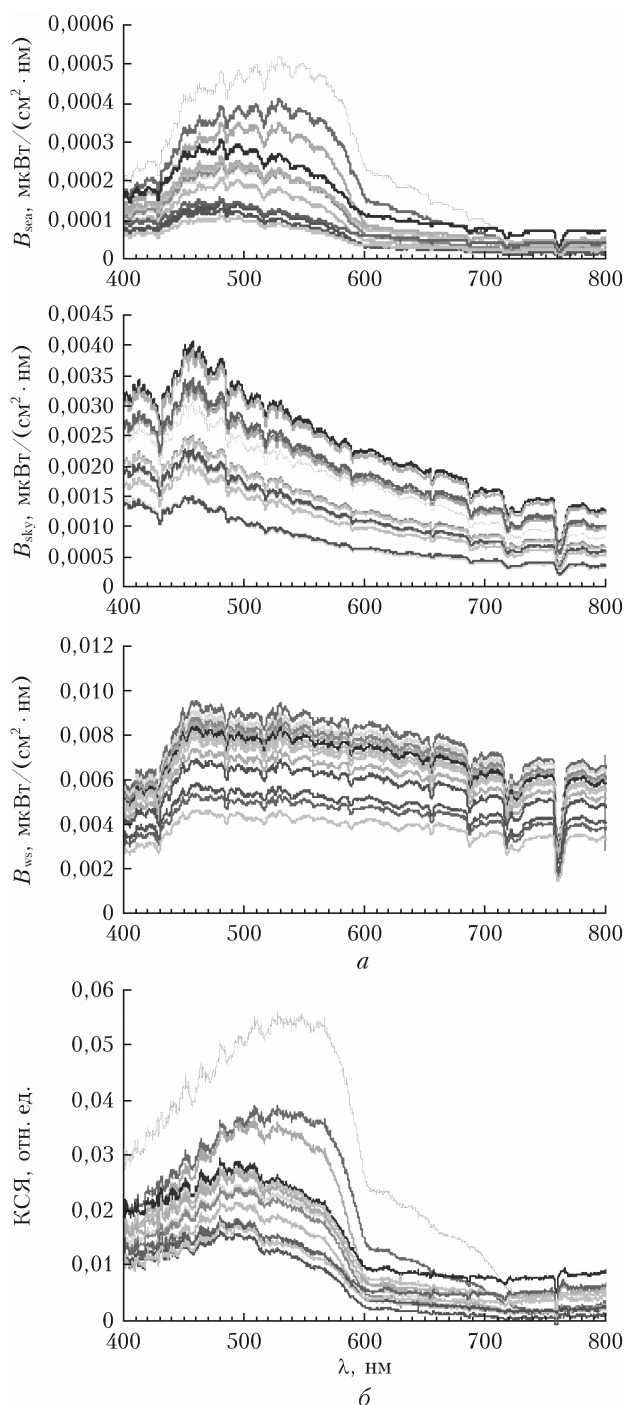


Рис. 2. Спектры яркости морской поверхности, яркости отражающегося от поверхности участка неба и освещенности морской поверхности, пересчитанной в яркость белого горизонтального диффузного экрана, полученные гиперспектрометром ЭММА 4.09.2019 г. (а); спектры КСЯ, рассчитанные по этим данным (б)

и в спектрах КСЯ. Наиболее ярко на всех спектрах КСЯ видна «ступенька» в диапазоне 550–650 нм: она является следствием резко меняющегося в этом диапазоне показателя поглощения света водой [14]. Используя это свойство КСЯ, с помощью алгоритма [15] мы рассчитали спектры показателя погло-

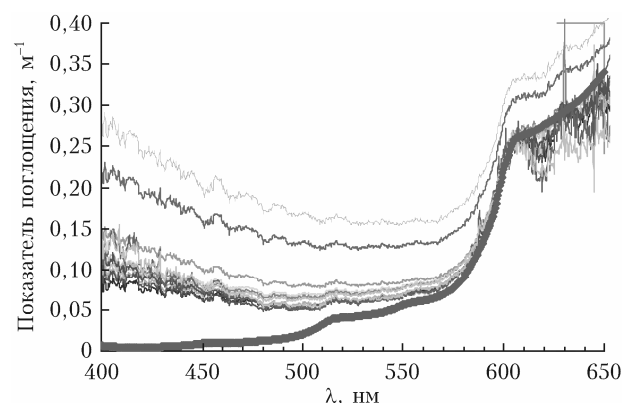


Рис. 3. Спектры суммарного поглощения света водой 4.09.2019 г. при пересечении Керченского пролива от кавказского берега к крымскому; полужирной линией показано поглощение света чистой водой

щения света водой. Результат расчетов в Керченском проливе для 4.09.2019 г. показан на рис. 3. Алгоритм [15] позволил нам от безразмерных величин спектров КСЯ перейти к размерным значениям показателей поглощения. Чтобы проверить корректность такого перехода, необходимо провести сравнение с другими оценками показателя поглощения света.

Сравнение данных, полученных оптическим гиперспектрометром ЭММА, с результатами сопутствующих измерений

На каждой станции проводился забор и анализ проб воды с поверхности, однако эти оценки характеризовали только поверхностный слой воды, а в прибрежной зоне моря, особенно в проливе, распределение природных компонентов морской воды по глубине может и не быть равномерным. Пассивный оптический метод зондирования дает оценки поглощения света, средние по глубине проникновения света в толщу воды. В настоящем исследовании по этому принципу работал только один метод — метод оценки глубины видимости диска Секки. В небольшом диапазоне этого параметра можно считать, что средний по глубине показатель поглощения воды обратно пропорционален глубине видимости диска Секки.

В Керченском проливе в сентябре 2019 г. измерения глубины видимости диска Секки проводились на станциях, 3 и 4 сентября одновременно работал комплекс ЭММА (5 сентября станции были организованы вечером, при недостаточном для работы оптического комплекса освещении). На рис. 4 построена зависимость показателей поглощения на той длине волны, где достигается максимум КСЯ (ясно, что наилучшие условия для наблюдения диска на самой большой глубине будут на этой длине волны) от обратной величины глубины видимости диска Секки. Видно, что наблюдается линейная зависимость этих величин друг от друга с высоким коэффициентом детерминации. Из 27 за-

меров только один существенно отклоняется от полученной зависимости, однако, если этот замер убрать, то линия тренда сдвинется незначительно. Как будет показано ниже, измерения на ст. 23, ближайшей к восточному берегу пролива, 4.09.2019 г. проводились в районе резких переходов от одного типа вод к другому, поэтому, возможно, измеренная глубина видимости диска Секи принадлежала здесь другой водной массе. Это подтверждается еще и тем, что в начальной точке маршрута НИС 3.09.2019 г. (ст. 24), ближайшей к западному берегу, при том же значении показателя поглощения глубина видимости диска Секки была существенно большей (2,8 м против 1,8 м).

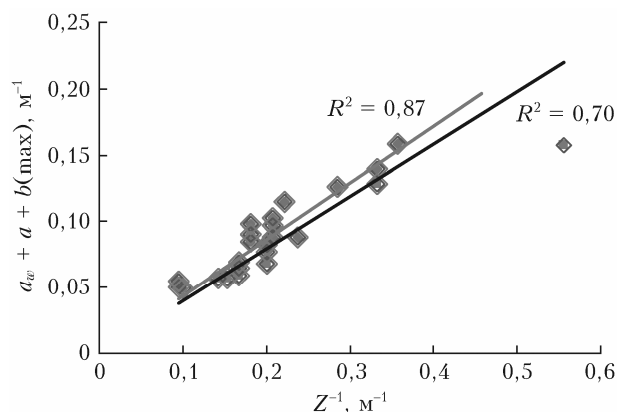


Рис. 4. Зависимость показателей поглощения света водой (ромбы), рассчитанных на длине волны максимального КСЯ 3 и 4 сентября 2019 г., от величины, обратной глубине видимости диска Секки

Полученный результат говорит об адекватной работе алгоритма определения спектров показателя поглощения по данным комплекса ЭММА. Далее после вычитания поглощения света самой водой получаем суммарный спектр поглощения света природными компонентами, содержащимися в данных водах (рис. 5). Моделируя спектры поглощения трех

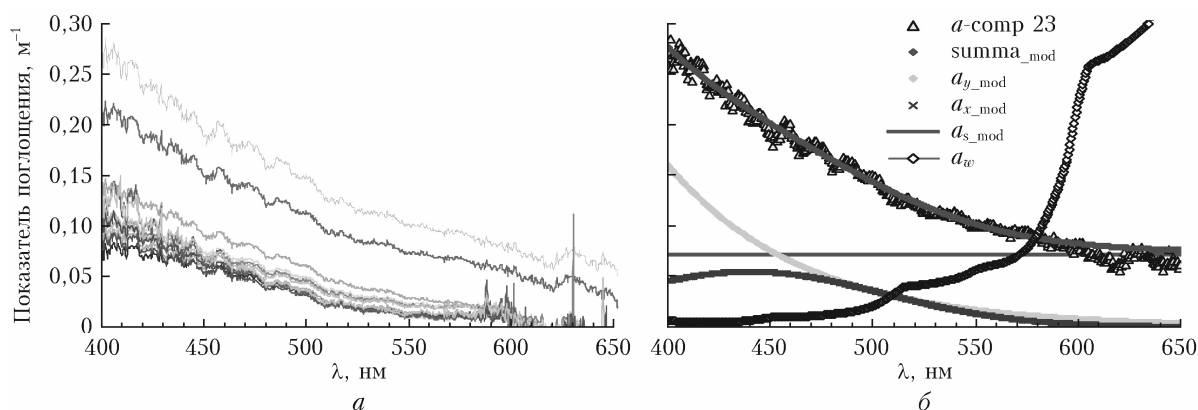


Рис. 5. Спектры суммарного поглощения трех основных природных компонентов морской воды по данным комплекса ЭММА 4.09.2019 г. (а); пример оценки концентрации основных природных компонентов морской воды в единицах поглощения (б): пигментов фитопланктона (a_x) на длине волны голубого максимума их поглощения ($a_{x,440} = 0,055 \text{ м}^{-1}$), растворенного органического вещества a_y на $\lambda = 500 \text{ нм}$ ($a_{y,500} = 0,036 \text{ м}^{-1}$) и минеральной взвеси a_s , поглощение которой считается неселективным в этом диапазоне ($a_s = 0,072 \text{ м}^{-1}$) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.12>)

основных природных компонентов морской воды, подбираем такие их концентрации, которые обеспечивают наилучшее приближение к полученному суммарному спектру.

Оценки концентрации этих компонентов можно сравнить со значениями, полученными в пробах, взятых с поверхности на станциях. После их фильтрации определяли показатель поглощения минеральной взвеси на 750 нм ($a_{s,750}$) и показатель поглощения органической взвеси на 440 нм ($a_{org,440}$), который является суммой поглощения света пигментами фитопланктона и детритом [17].

Из рис. 6 видно, что в целом оценки поглощения света органической взвесью в поверхностном слое и оценки поглощения света пигментами фитопланктона и «желтым веществом», включающим в себя как растворенную органику, так и детрит, близки. В то же время 3.09.2019 г. в поверхностном слое воды минеральной взвеси было существенно меньше, чем в среднем по просвечиваемому слою воды; 4.09.2019 г. перемешивание было более сильным и оценки практически совпали. Данные, полученные 4.09.2019 г. в пробах, использовались нами для калибровки результатов дистанционного зондирования комплексом ЭММА с целью перевода их из единиц поглощения света (м^{-1}) в единицы концентрации (мг/л).

Подтверждение этих выводов можно найти при анализе распределения солёности воды по глубине: 3.09.2019 г. при пересечении пролива менее солёные воды наблюдались у поверхности, т.е. воды, близкие по составу к азовоморским, были на поверхности, более глубокие слои воды соответствовали более солёным черноморским; 4.09.2019 г. состав воды менялся от станции к станции, а не по глубине, поэтому оценки у поверхности практически совпали с оценками по всему оптически прозрачному слою.

Таким образом, сравнение оценок по данным пассивного оптического гиперспектрометра с оценками концентрации природных компонент

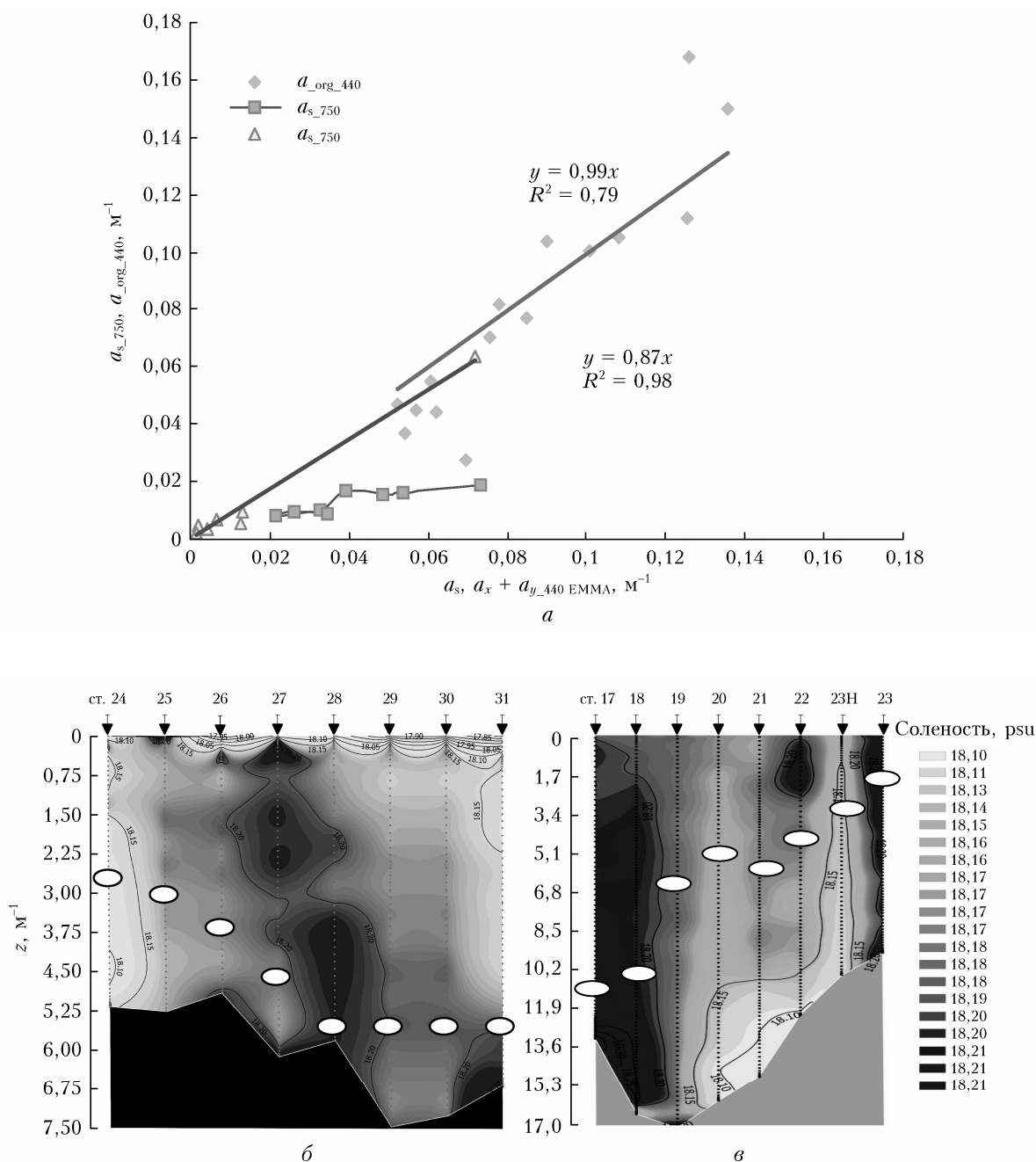


Рис. 6. Сопоставление результатов, полученных с помощью комплекса ЭММА, и проб воды с поверхности после фильтрации (а); сравнение с картиной распределения солености по глубине 3 (б) и 4 сентября 2019 г. (в); овалы — глубина видимости диска Секки

в пробах с поверхности позволяет сделать вывод о равномерности распределения компонентов по глубине.

Оценка изменений в распределении природных компонентов по акватории при антропогенном воздействии

На спутниковых снимках был зарегистрирован сброс грунта 4 и 5.09.2019 г. (рис. 7) в районе

движения НИС. Пересчитав полученные ранее оценки показателей поглощения света взвесью в концентрацию взвешенного вещества в мг/л [17], мы получили количественные оценки распределения взвеси по акватории пролива.

Из рис. 7 видно, что произошло общее увеличение количества взвеси более чем в три раза за два дня и показан район ее преимущественного распространения.

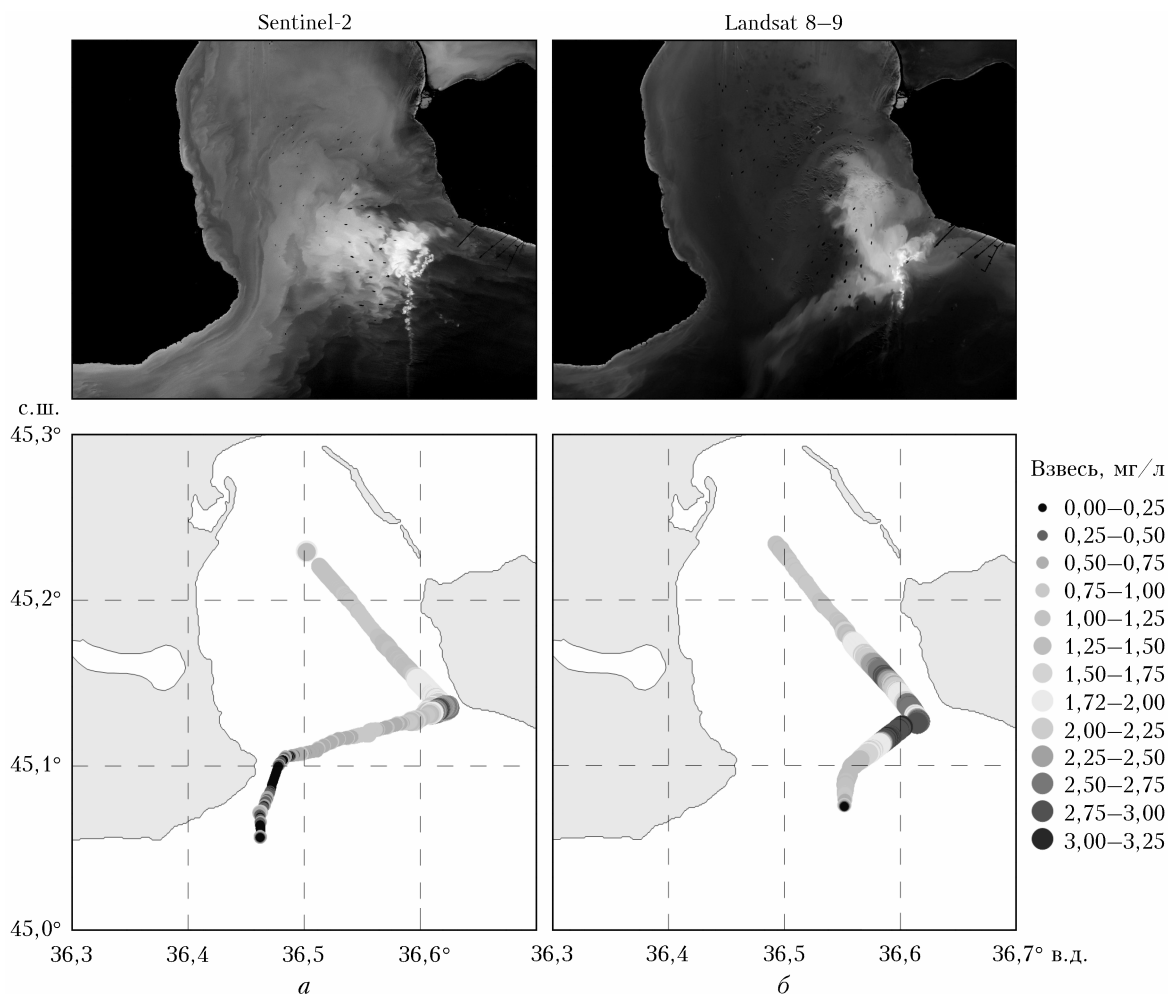


Рис. 7. Распределение взвешенного вещества по данным гиперспектрометра ЭММА 4 (а) и 5.09.2019 г. (б) в Керченском проливе при сбросе грунта, зафиксированном по информации со спутников в те же дни

Заключение

В акваториях, где наблюдается сложный характер смешения вод различного типа, например таких, как Керченский пролив, оптический комплекс ЭММА дает возможность оперативного количественного определения распределения основных компонентов прибрежных вод (взвесь, пигменты фитопланктона и окрашенного органического вещества) с борта движущегося судна, что необходимо для различных целей, в том числе и для подспутниковых измерений. Для верификации таких оценок, полученных по данным дистанционного зондирования, использовался оригинальный метод сравнения с результатами классических измерений: результаты расчета спектров показателя поглощения света водой, полученных по данным комплекса ЭММА, были сопоставлены с величиной, обратной глубине видимости диска Секки.

Сравнение данных комплекса ЭММА по средней концентрации каждого из природных компонентов в столбе жидкости, просвечиваемой солнцем, со значениями концентрации, полученными при обработке проб воды с поверхности, позволило выявить районы с неравномерным распределением компо-

нентов по глубине. Оказалось, что 3 сентября при более слабом ветре концентрация взвеси в пробах была меньше, чем в среднем по глубине; 4 сентября эти концентрации сравнились, причем зондирование температуры и солености воды по глубине на станциях подтвердило сделанные выше выводы.

Таким образом, для калибровки дистанционно полученных данных с целью пересчета их в единицы концентрации (мг/л) можно было использовать только данные измерений 4.09.2019 г. Эффект неравномерного распределения взвеси по глубине следует учитывать при оценке загрязнения воды по данным обработки проб с поверхности. Так, в работе [13] более высокие концентрации взвеси, полученные в апреле (по сравнению с июлем), могут объясняться не только увеличением материкового стока, но и более интенсивным перемешиванием поверхностных и более глубоких слоев воды.

Для анализа антропогенного воздействия на прибрежную акваторию пассивный оптический мониторинг с борта судна дает количественные оценки состояния вод. В рассматриваемые два дня судно пересекало место сброса грунта в пролив, отмеченное по спутниковым данным, по близким маршрутам. Сравнение картин распределения взвеси, полученных

за эти два дня, позволяет оценивать ее концентрацию и перемещение по акватории. Кроме того могут быть получены оценки состояния других натуральных компонентов морской воды в этом районе.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и образования РФ № FMWE 0128-2021-0001 (расчет концентрации природных компонентов по данным оптического гиперспектрометра), а также при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-55-00191) (оценка антропогенного воздействия на акваторию Керченского пролива).

Список литературы

1. Rostovtseva V., Goncharenko I., Kononov B. Marine coastal zones monitoring by shipborne semiautomatic passive optical complex // *Int. J. Remote Sens.* 2018. P. 1–13. DOI: 10.1080/01431161.2018.1526427.
2. Alikas K., Ansko I., Vabson V., Ansper A., Kangro K., Uudeberg K., Ligi M. Consistency of radiometric satellite data over lakes and coastal waters with local field measurements // *Remote Sens.* 2020. V. 12. P. 616–634. DOI: 10.3390/rs12040616.
3. Jiang G., Loisel S.A., Yang D., Ma R., Su W., Gao Ch. Remote estimation of chlorophyll a concentrations over a wide range of optical conditions based on water classification from VIIRS observations // *Remote Sens. Environ.* 2020. V. 241, N 4. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111735.
4. Sözer A., Özsoy E. Water Exchange through Canal İstanbul and Bosphorus Strait // *Mediterr. Mar. Sci.* 2017. V. 18. P. 77–86.
5. Constantin S., Doxaran D., Constantinescu S. Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data // *Cont. Shelf Res.* 2016. V. 112. P. 14–30.
6. Чепыженко А.А., Чепыженко А.И., Кушнир В.М. Структура вод Керченского пролива по данным контактных измерений и космических съемок // *Океанология.* 2015. Т. 55, № 1. С. 56–56.
7. Kubryakov A.A., Aleskerova A.A., Goryachkin Yu.N., Stanichny S.V., Latushkin A.A., Fedirko A.V. Propagation of the Azov Sea waters in the Black sea under impact of variable winds, geostrophic currents and exchange in the Kerch Strait // *Progr. Oceanogr.* 2019. V. 176. P. 1–24. DOI: 10.1016/j.pcean.2019.05.011.
8. Zavialov I., Osadchiv A., Sedakov R., Barnier B., Molines J.M., Belokopytov V. Water exchange between the Sea of Azov and the Black Sea through the Kerch Strait // *Ocean Sci.* 2020. V. 16, N 1. P. 15–30.
9. Завьялов И.Б., Осадчиев А.А., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Гончаренко И.В. Исследование водообмена в Керченском проливе по историческим данным и данным контактных измерений 2019 г. // *Океанология.* 2021. Т. 61, № 3. С. 377–386.
10. Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Поле концентрации растворенного органического вещества в Азовском море и Керченском проливе на базе оптических наблюдений // *Морской гидрофиз. журн.* 2016. № 5. С. 76–88.
11. Митягина М.И., Лаврова О.Ю., Бочарова Т.Ю. Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2015. Т. 12, № 5. С. 130–149.
12. Немировская И.А., Онегина В.Д., Коновалов Б.В., Лищицын А.П. Происхождение углеводородов во взвеси и донных осадках в районе Крымского полуострова // *Докл. РАН.* 2019. Т. 484, № 5. С. 600–604.
13. Завьялов П.О., Завьялов И.Б., Ижицкий А.С., Ижицкая Е.С., Коновалов Б.В., Кременецкий В.В., Немировская И.А., Часовников В.К. Оценка загрязнения Керченского пролива и прилегающей акватории Черного моря по данным натурных измерений 2019–2020 гг. // *Океанология.* 2022. Т. 62, № 2. С. 194–203.
14. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. Integrating cavity measurements // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. P. 8710–8723.
15. Ростовцева В.В. Метод получения спектров поглощения морской воды по данным пассивного дистанционного зондирования с борта судна с использованием свойств чистой воды // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 11. С. 1003–1011; Rostovtseva V.V. Method for sea water absorption spectra estimation on the basis of shipboard passive remote sensing data and pure sea water properties // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 2. P. 162–170.
16. Гончаренко И.В., Ростовцева В.В. Пассивное оптическое зондирование речных плумов с борта судна с помощью гиросtabilизированного комплекса ЭММА // *Фундамент. и приклад. гидрофиз.* 2020. Т. 13, № 2. С. 96–102. DOI: 10.7868/S2073667320020124.
17. Коновалов Б.В., Краевичина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н. Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению // *Океанология.* 2014. Т. 54, № 4. С. 1–9.

V.V. Rostovtseva, A.S. Izhitskiy, B.V. Kononov. Characterization of different water types in the Kerch Strait based on shipborne remote optical measurements.

Study of the state of the Kerch Strait water area was carried out using data from a portable three-channel hyperspectrometer EMMA (Ecological Monitoring of Marine Areas), operating from board a moving vessel during daylight hours with a resolution of several meters along the route. Based on the measured spectra of the sea spectral radiance coefficient, the spectra of the light absorption index by water in the Kerch Strait were calculated. Verification of these data was carried out at the stations by measurements of Secchi disk visibility depth. The concentrations of the three main natural components averaged over the depth of light penetration into the water column were calculated from the spectra of total light absorption by water. They were compared with measurements in surface water samples taken along the route. The discrepancy in these estimates in some areas indicates a nonuniform depth distribution of the components, which was confirmed by vertical sounding at the stations; these areas are not used for calibration of remote sensing results. The EMMA data showed the distribution of the natural components in the water area of the Kerch Strait averaged over the depth of light penetration. It also made it possible to estimate some characteristics of the anthropogenic impact recorded by satellites.