

Окрашенное растворенное органическое вещество и общее взвешенное вещество как показатели загрязнения вод Керченского пролива

П. Д. Ломакин , А. А. Чепыженко, А. И. Чепыженко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
 *p_lomakin@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.12.2024; одобрена после рецензирования 17.03.2025;
принята к публикации 15.05.2025.

Аннотация

Цель. На основе данных серии экспедиций, проведенных в 2001–2014 гг., выявить закономерности структуры поля концентрации окрашенного растворенного органического вещества и общего взвешенного вещества антропогенного происхождения в Керченском проливе; определить загрязненные участки акватории и связанные с ними источники; оценить линейный масштаб их влияния на водную среду; сравнить полученный результат с известными сведениями о загрязнении вод пролива, полученными на основе гидрохимических и спутниковых методов, – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Загрязненные участки исследуемой акватории выделены по расположению локальных максимумов концентрации окрашенного растворенного органического вещества и общего взвешенного вещества. Показано, что анализируемые вещества антропогенной природы локализованы в виде отдельных линз с повышенным относительно фона содержанием. Их профили имеют характерную интрузионную форму, также сходны эмпирические распределения концентрации этих веществ. Обнаружено 13 линз с горизонтальным масштабом 1–6 миль. Каждая линза формировалась под воздействием конкретного источника. В основном это судоходство и судоходные каналы, дноуглубление и дампинг изъятых грунтов, порты и пункты рейдовой перегрузки, грузовые терминалы, грунтовые свалки. Отдельно как источник антропогенной взвеси рассмотрена тузлинская промоина. Показано, что через 5–10 лет с момента возникновения промоина оставалась значимым источником антропогенной взвеси, обеспечивая ее концентрацию в центре пролива на порядок выше окружающего фона.

Выводы. Раскрыты закономерности структуры поля концентрации окрашенного растворенного органического вещества и общего взвешенного вещества антропогенного происхождения в Керченском проливе. Выявлены загрязненные участки акватории и связанные с ними источники, оценен линейный масштаб их влияния на водную среду. При сравнении полученного результата с известными исследованиями загрязнения вод региона обнаружено хорошее сходство.

Ключевые слова: окрашенное растворенное органическое вещество, общее взвешенное вещество, структура вод, загрязнение, Керченский пролив

Благодарности: работа выполнена в рамках тем государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0016 и FNNN-2024-0012.

Для цитирования: Ломакин П. Д., Чепыженко А. А., Чепыженко А. И. Окрашенное растворенное органическое вещество и общее взвешенное вещество как показатели загрязнения вод Керченского пролива // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 4. С. 467–483. EDN ASKRCT.

Colored Dissolved Organic Matter and Total Suspended Matter as the Indicators of Water Pollution in the Kerch Strait

P. D. Lomakin , A. A. Chepyzhenko, A. I. Chepyzhenko

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 *p_lomakin@mail.ru*

Abstract

Purpose. Based on the data obtained in a number of expeditions in 2001–2014, the study purposes to identify the patterns in the structure of concentration fields of colored dissolved organic matter and total suspended matter of anthropogenic origin in the Kerch Strait, to reveal the polluted areas in the region under study and the related sources, and to assess the linear scale of their impact on aquatic environment, as well as to compare the result obtained with the already known data on pollution of the strait waters derived from the contact hydrochemical and satellite measurements.

Methods and Results. Polluted areas of the studied water area are identified by the location of local maxima concentrations of colored dissolved organic matter and total suspended matter. It is shown that the considered substances of anthropogenic origin are localized in the form of individual lenses with an increased content relative to the background. Their profiles are of a characteristic intrusive shape, and the concentration empirical distributions of these substances are also similar. Thirteen lenses with a horizontal scale of 1–6 miles were found. Each lens was shaped under the effect of a specific source. Basically, these mainly are shipping and shipping canals, dredging and dumping of seized soil, ports and offshore transshipment points, cargo terminals, and landfills. The Tuzla ravine is considered separately as a source of anthropogenic suspended matter. It is shown that after 5–10 years from its occurrence, the ravine remains a significant source of anthropogenic suspended matter that increases its concentration in the strait center by an order of magnitude as compared to the surrounding background.

Conclusions. The structure regularities of concentration fields of colored dissolved organic matter and total suspended matter of anthropogenic origin in the Kerch Strait are revealed. The polluted parts of water area and the related sources are identified, as well as the linear scale of their impact on aquatic environment is assessed. Comparison of the obtained results with the already known studies of water pollution in the designated region has shown good similarity.

Keywords: colored dissolved organic matter, total suspended matter, water structure, pollution, Kerch Strait

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of state assignment on themes FNNN-2024-0016 and FNNN-2024-0012.

For citation: Lomakin, P.D., Chepyzhenko, A.A. and Chepyzhenko, A.I., 2025. Colored Dissolved Organic Matter and Total Suspended Matter as the Indicators of Water Pollution in the Kerch Strait. *Physical Oceanography*, 32 (4), pp. 492-507.

Введение

С 60-х гг. прошлого столетия в Керченском регионе наблюдался заметный рост промышленного производства. В акватории Керченского пролива активизировалось судоходство, что сопровождалось развитием и строительством инфраструктурных объектов, обеспечивающих эксплуатацию судов различного назначения и тоннажа. Возникла мощная антропогенная нагрузка на водную среду региона, системное изучение которой различными методами было начато примерно с 70-х гг. прошлого столетия и продолжается в настоящее время ведущими научно-исследовательскими институтами.

Это исследования, выполненные на основе традиционных гидрохимических методов: мониторинг загрязнения вод Керченского пролива, реализованный Государственной гидрометеорологической службой Украины в 1979–2009 гг. [1]; мониторинг загрязнения вод и грунтов пролива и предпроливных акваторий, который был проведен Южным научно-исследовательским институтом морского рыбного хозяйства и океанографии (ЮгНИРО) в 1990–2015 гг. [2]; исследование уровня загрязнения донных осадков Керченского пролива тяжелыми металлами, выполненные Морским гидрофизическим институтом (МГИ) по материалам ряда экспедиций в 2005–2008 гг. [3]; исследования загрязнения вод, взвешенного вещества и грунта, осуществленные Институтом океанологии РАН (ИО РАН) в 2019–2022 гг. [4]. В настоящее время сотрудниками ИО РАН ведется мониторинг техногенного загрязнения водного пространства региона на основе оптического и радиолокационного методов дистанционного зондирования [5].

В 2001–2015 гг. по материалам экспедиций, проведенных ведущими отечественными научно-исследовательскими институтами, изучалось загрязнение вод Керченского пролива окрашенным растворенным органическим веществом (ОРОВ) и общим взвешенным веществом (ОВВ) антропогенной природы при помощи океанографического метода – анализа структуры полей концентрации этих величин. Отметим, что ОРОВ и ОВВ относят к эффективным показателям загрязнения прибрежных вод океанов и морей [6–8].

Цель настоящей работы – выявить закономерности в структурах полей концентрации ОРОВ и ОВВ антропогенного происхождения; проанализировать статистические характеристики изменчивости содержания этих веществ; определить загрязненные участки акватории Керченского пролива, установив связанные с ними источники загрязнения вод; оценить линейный масштаб воздействия выявленных источников на водную среду; сравнить полученный результат с имеющимися сведениями о загрязнении вод пролива, полученными на основе контактных гидрохимических и спутниковых методов.

Исходные данные и методы исследования

Для анализа использованы материалы серии экспедиций в Керченский пролив, которые были проведены в 2001–2014 гг. МГИ, и совместных экспедиций МГИ с ЮгНИРО, Институтом биологии южных морей им. А. О. Ковалевского (ИнБЮМ), Всероссийским научно-исследовательским институтом рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО), Государственным океанографическим институтом имени Н. Н. Зубова (ГОИН), Южным научным центром (ЮНЦ) Российской академии наук.

В этих экспедициях были реализованы крупномасштабные (в рамках региона) съемки акватории всего Керченского пролива и отдельных его областей – северной и центральной частей пролива, а также Керченской бухты, которые включали 1443 зондирования, выполненных с борта маломерных судов преимущественно на дрейфовых станциях. На загрязненных участках рассматриваемой акватории проведена серия микросъемок, включающих 83 станции. Детальное описание массива можно найти в работе [2]. Каждое зондирование содержит информацию о вертикальном распределении температуры, солености, концентрации ОРОВ и ОВВ. Эти величины измерялись синхронно *in situ* с дискретностью по глубине 0,1 м.

Отметим, что в практике как зарубежных, так и отечественных экспериментальных исследований приняты две единицы измерения концентрации ОРОВ: оптическая – *QSU* и весовая – мг/л (работа ¹ и [9–11]). В указанных публикациях приведены формулы взаимного пересчета этих единиц для различных регионов Мирового океана, Средиземного моря и пресных водоемов. Они представляют собой линейные зависимости с высоким коэффициентом корреляции в диапазоне 0,92–0,97. В настоящей работе содержание ОРОВ выражено в *QSU*, диапазон исследованных глубин 0,5–50 м. Для анализа отобраны 702 зондирования на участках рассматриваемой акватории с глубиной более 2 м.

Все наблюдения выполнены при помощи автономного гидробиофизического мультипараметрического оптического зондирующего комплекса «Кондор» ².

Под термином «загрязнение» авторы этой работы подразумевают два вида загрязнения водной среды – *contamination* и *pollution*. Используя термин «загрязнение», мы придерживаемся определения *contamination*, которое означает присутствие вещества там, где его не должно быть, или оно не предусмотрено природой, или находится в концентрации выше фона. *Pollution* – также загрязнение, которое приводит или может привести к неблагоприятным биологическим последствиям для местных сообществ.

Существует простой метод определения загрязненных участков в прибрежных акваториях океанов и морей, а также в пресных водоемах, который широко используется в мировой практике. В поле концентрации изучаемых веществ они выделяются в виде локальных максимумов (неприродных образований) [12]. В нашей ситуации ОРОВ и ОВВ антропогенной природы выделялись в полях горизонтального распределения концентрации этих величин по локальным максимумам, а степень антропогенного воздействия на тот или иной участок рассматриваемой акватории оценивалась отношением максимальной концентрации к концентрации окружающего фона.

Анализ структуры полей концентрации ОРОВ и ОВВ на загрязненных участках выполнен в следующей последовательности. По данным каждой съемки были выделены участки акватории с локальными максимумами концентрации рассматриваемых величин в поверхностном слое вод, для которых отобраны и проанализированы профили ОРОВ(*z*) и ОВВ(*z*). Затем по всему исходному массиву данных были организованы кластеры профилей ОРОВ(*z*) и ОВВ(*z*) и рассчитаны гистограммы повторяемости концентрации этих веществ в поверхностном слое моря. Далее были картированы наиболее масштабные локальные максимумы концентрации ОРОВ и ОВВ, а их локации сравнивались с расположением объектов хозяйственно-промышленной деятельности региона, что позволило определить источники (конкретные объекты), загрязняющие каждый из выявленных участков. Обнаруженные таким

¹ What, where, when and how much? Combining watershed NOM source and reactivity studies with real-time monitoring : [presentation] / T. Kraus [et al.] // Fourth IWA specialty conference on natural organic matter: from source to tap and beyond, Costa Mesa, California, USA, 27–29 July 2011. 42 p. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/24461784/presentation> (date of access: 01.07.2025).

² URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 23.11.2024).

образом участки и загрязняющие их объекты сопоставлены с результатами исследований источников загрязнения акватории Керченского пролива, которые отражены в работах [1–5].

Для оценки значимости судоходства как фактора, загрязняющего воды пролива антропогенной взвесью, были организованы наблюдения за кильватерным следом движущихся основным судоходным каналом судов. Для этого экспедиционное судно крепилось к одному из буев, обозначавших сторону фарватера, что позволило отбирать пробы воды из кильватерного следа на определение содержания ОВВ и визуально оценивать состав и скорость распространения следа.

Содержание ОВВ в ходе дноуглубительных работ в акватории Керченского морского торгового порта проанализировано по результатам микро-съемки, проведенной ЮгНИРО летом 2000 г.

Обсуждение результатов

Анализ структуры фактических полей концентрации ОРОВ и ОВВ по каждой конкретной съемке показал, что в Керченском проливе поля изучаемых веществ характеризуются особыми свойствами. В отличие от открытых вод Азовского и Черного морей и незагрязненных прибрежных акваторий они деформированы неоднородностями – линзами вод различного масштаба и объема, которые содержат ОРОВ и ОВВ антропогенного происхождения. Эти довольно часто наблюдаемые образования на фоне относительно однородных природных полей концентрации анализируемых веществ выделяются в виде локальных максимумов (рис. 1), которых, согласно [12], не должно быть в природе.

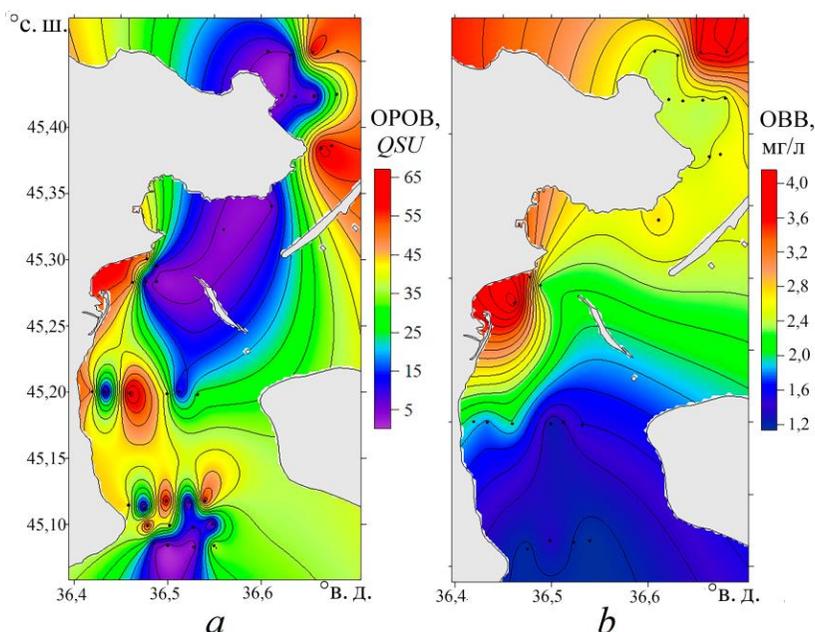


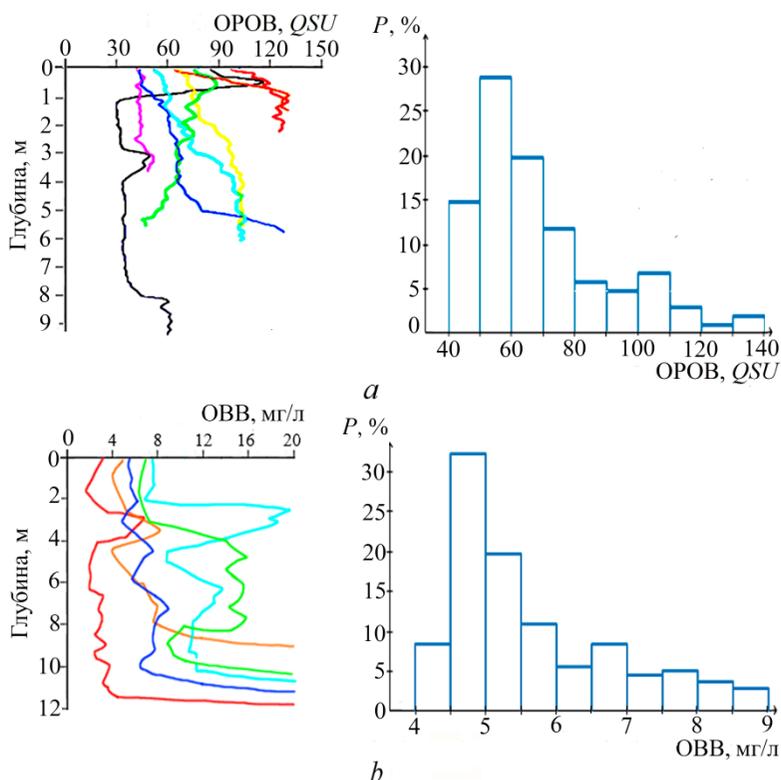
Рис. 1. Распределение концентрации ОРОВ (a) и ОВВ (b) в поверхностном слое вод в апреле 2008 г.

Fig. 1. Distribution of CDOM (a) and TSM (b) concentrations in the surface water layer, April 2008

Анализ формы профилей исследуемых величин, диаграмм распределения их концентрации и расположения основных локальных максимумов в акватории Керченского пролива показал следующее. Двум рассматриваемым веществам свойственны сходные признаки вертикальной стратификации. Профиль ОРОВ(z), как и профиль ОБВ(z), представляет собой немонотонную функцию глубины с характерной изрезанной формой, которая отличается от «гладких» профилей этих величин в незагрязненных окружающих водах, что указывает на наличие интрузий с повышенным содержанием этих веществ.

В водной толще на загрязненных участках отмечаются отдельные слои и прослойки, где концентрация ОРОВ и ОБВ заметно увеличена. Эти структурные особенности в виде локальных максимумов концентрации свидетельствуют об антропогенных растворенных и взвешенных в воде веществах, загрязняющих воды пролива (рис. 2).

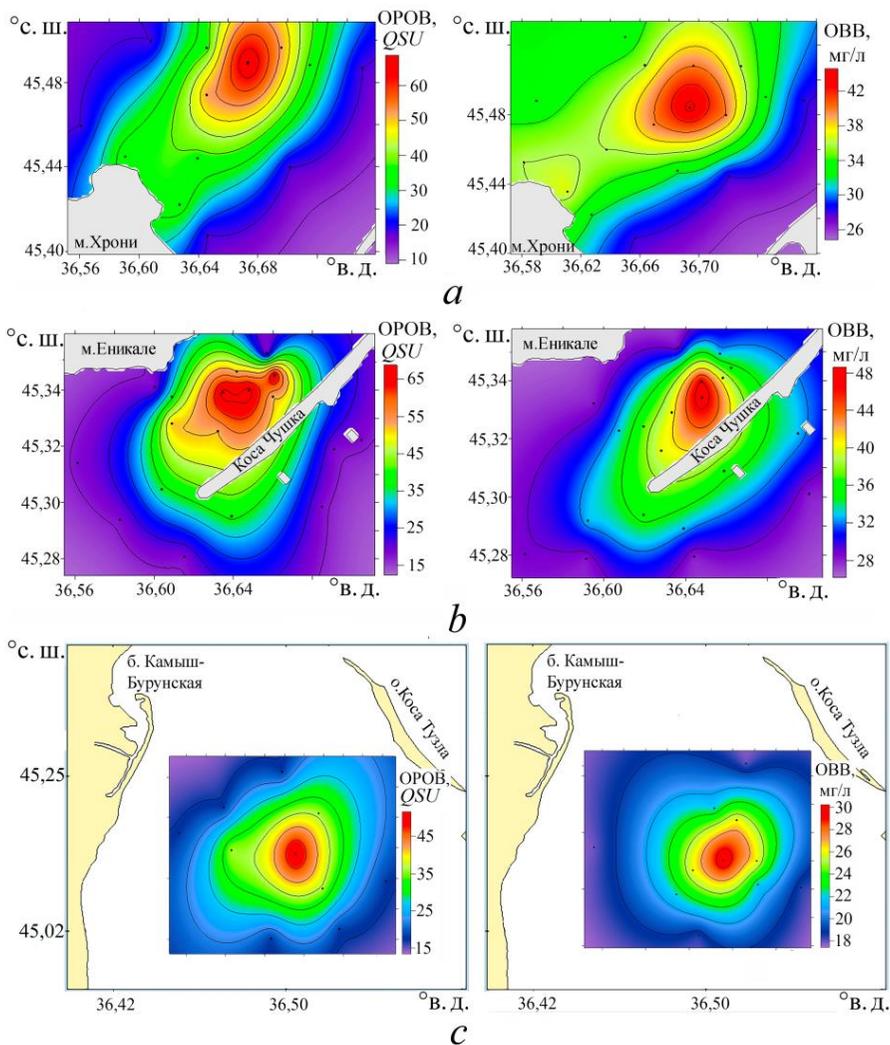
Диаграммы распределения концентрации ОРОВ и ОБВ в поверхностном слое вод имеют похожую форму, они одномодальны и правасимметричны. Наиболее часто повторяемая концентрация меньше среднего значения. Примерно одинаковую повторяемость 30% имеет модальное значение концентрации обоих веществ (рис. 2).



Р и с. 2. Типовые профили ОРОВ(z) в водах, содержащих антропогенную составляющую (слева), и гистограмма повторяемости концентрации ОРОВ в поверхностном слое моря (справа) – *a*; эти же характеристики для ОБВ – *b*

Fig. 2. Typical CDOM (z) profiles for the waters containing anthropogenic component (left), and histogram of CDOM concentration frequency in the sea surface layer (right) – *a*; the same characteristics for TSM – *b*

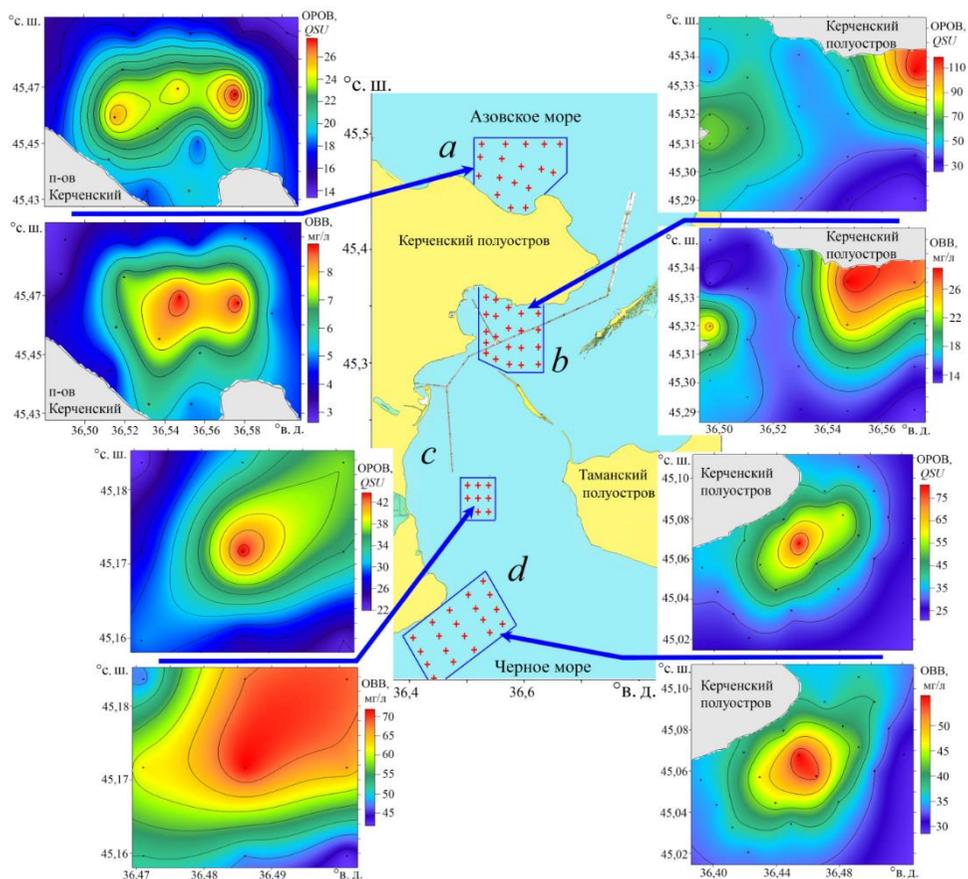
Также выяснилось, что практически на всех загрязненных участках наблюдались локальные максимумы концентрации в полях ОРОВ и ОБВ. Это свойство проиллюстрировано для трех закрытых свалок изъятых при дноуглубительных работах грунта (рис. 3), а также для четырех загрязненных участков, расположенных в районе очистных сооружений г. Керчь, в Керченской бухте, в районе площадки рейдовой перегрузки и действующей грунтовой свалки у м. Такиль (рис. 4). В полях концентрации обеих величин видны практически совпадающие отчетливо выраженные локальные максимумы. Различается конфигурация и площадь пятен загрязнения.



Р и с. 3. Концентрация ОРОВ (слева) и ОБВ (справа) в придонном слое в зонах дампинга: *a* – свалка у м. Хрони, май 2012 г.; *b* – свалка у косы Чушка, октябрь 2013 г.; *c* – свалка к югу от о. Тузла, май 2005 г.

Fig. 3. CDOM (left) and TSM (right) concentrations in the bottom layer of dumping zones: *a* – landfill near Khroni Cape, May 2012; *b* – landfill near Chushka Spit, October 2013; *c* – landfill south of Tuzla Island, May 2005

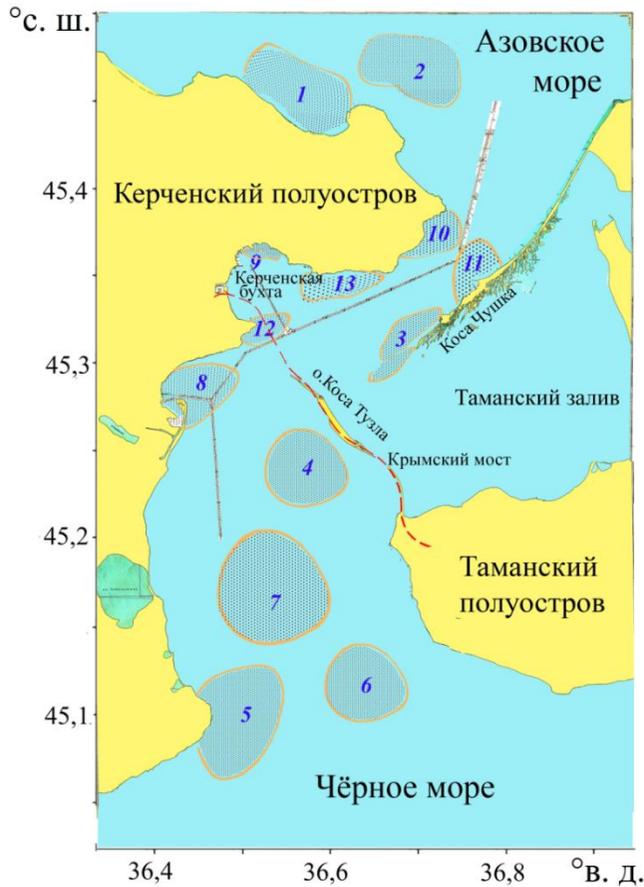
Подобие вертикальной структуры, характеристик эмпирического распределения концентрации (рис. 2) и совпадение локаций (рис. 3, 4) – доказательство того, что анализируемые «неприродные» структуры формируются под воздействием сходных антропогенных факторов и объектов, загрязняющих водное пространство.



Р и с. 4. Концентрация ОРОВ и ОВВ на загрязненных участках исследуемой акватории: участок у очистных сооружений, поверхностный слой, май 2007 г. (а); Керченская бухта, горизонт 3 м, май 2005 г. (b); площадка рейдовой перевалки грузов, придонный слой, сентябрь 2008 г. (с); действующая грунтовая свалка, придонный слой, июнь 2012 г. (d)

F i g. 4. CDOM and TSM concentrations in the polluted areas of the region under study: near treatment facilities, surface layer, May 2007 (a); Kerch Bay, the 3 m horizon, May 2005 (b); roadstead cargo handling site, bottom layer, September 2008 (c); operating landfill, bottom layer, June 2012 (d)

Линзы вод, содержащие ОРОВ и ОВВ антропогенного происхождения, были обнаружены во всей акватории Керченского пролива и в предпроливных областях. Они картированы и в виде пронумерованных пятен показаны на рис. 5, а приведенная на рис. 6 схема расположения основных объектов промышленно-хозяйственной деятельности региона позволяет определить источники, загрязняющие каждый из выявленных участков.



Р и с. 5. Линзы вод с содержанием ОРОВ и ОБВ антропогенного происхождения
Fig. 5. Water lenses containing CDOM and TSM of anthropogenic origin

Из всех обнаруженных нами выделено 13 наиболее выраженных и масштабных (горизонтальный линейный размер 1–6 миль) линз, загрязненных ОРОВ и ОБВ (рис. 5).

Линза 1 находится у побережья азовского предпролива, в районе Бондаренковских канализационных очистных сооружений сточных хозяйственно-бытовых вод г. Керчь. Здесь максимальная концентрация ОРОВ (26 QSU) примерно в два раза превышала фоновое содержание (14 QSU), максимальная концентрация ОБВ (8,8 мг/л) была выше фонового содержания (2,8 мг/л) примерно в три раза (рис. 4, а; 5, б).

Линзы 2–5 расположены на участках грунтовых свалок (рис. 3; 4, d; 5, 6). Известно, что грунтовые свалки (зоны дампинга изъятых при дноуглубительных работах грунта) наносят урон, и часто серьезный, как живой, так и неживой природе. Их негативное воздействие на экологию моря активно исследуется мороведами различных стран. Всевозможные аспекты этой проблемы освещены в современной литературе (см., напр., [13–16]), а влияние действующей грунтовой свалки в районе м. Такиль как загрязнителя вод Керченского пролива и смежного участка Черного моря исследовано авторами работы [17].



Р и с. 6. Основные объекты, загрязняющие водную среду региона
Fig. 6. Main objects polluting aquatic environment of the region

Нам удалось выполнить микросъемки на участках четырех из семи известных грунтовых свалок региона (рис. 3; 4, *d*) и, в частности, в районе двух самых «старых», закрытых еще в 70-е гг. прошлого столетия, свалок, которые расположены к северо-востоку от м. Хрони и южнее о. Тузла. Несмотря на то что с момента последнего дампинга грунта на эти участки прошли десятки лет, в придонном слое указанных свалок сохранился негативный для природы след в виде локальных максимумов концентрации ОРОВ и ОБВ.

Так, в районе свалки у м. Хрони наблюдался максимум концентрации ОРОВ (60 *QSU*) на фоне 10 *QSU* и максимум концентрации ОБВ (43 мг/л) на фоне 25 мг/л (рис. 3, *a*). В области закрытой грунтовой свалки у южной оконечности косы Чушка нами был зафиксирован локальный максимум концентрации ОРОВ (65 *QSU*) на фоне 15 *QSU* и локальный максимум концентрации ОБВ (46 мг/л) на фоне 28 мг/л (рис. 3, *b*). Над свалкой к югу от о. Тузла соответствующие концентрации составили 50 и 15 *QSU*, 30 и 18 мг/л (рис. 3, *c*).

Интересно отметить, что максимум концентрации ОРОВ в рассматриваемых закрытых свалках превышал фоновое содержание в 3–6 раз, тогда как в поле концентрации ОБВ это соотношение было заметно меньше и составляло 2. Возможно, это свидетельство того, что ОРОВ в анализируемой ситуации – более чувствительный показатель загрязнения вод по сравнению с ОБВ.

Согласно мнению авторов работы [18], как в местах дноуглубления, так и на участках сброса изъятых грунтов негативные для природы последствия могут наблюдаться в течение длительного времени после прекращения дноуглубления и дампинга.

Линзы 6, 7 были выявлены на участках акватории, соответствующих двум пунктам рейдовой перевалки грузов (рис. 4, с; 5, б).

Микросъемки, проведенные ЮгНИРО и МГИ в районе западного пункта рейдовой перегрузки (площадка 451) в течение 1997–2008 гг., показали следующее. Данный пункт представляет собой постоянно действующий источник антропогенной взвеси во всей толще вод. В маловетренную погоду концентрация ОБВ на этом участке в 1,5–3 раза превосходит фоновую, а горизонтальный размер линзы загрязненных вод оценивается примерно в одну милю. В условиях свежего южного ветра линза вытягивалась в меридиональном направлении до 6 миль, а концентрация ОБВ в 5–6 раз превышала фон. Здесь также отмечено присутствие ОРОВ антропогенной природы, концентрация которого у дна достигала 45–52 *QSU* при фоновом значении 22 *QSU* (рис. 4, с).

Линза 8 соответствует участку загрязненной акватории у входа в Камыш-Бурунскую бухту, где находятся порты завода «Залив» и железорудного комбината. На этом участке ОРОВ и ОБВ антропогенной природы отмечались по результатам всех крупномасштабных съемок (рис. 5, б).

Линза 9 обнаружена нами в прибрежной западной части Керченской бухты, где функционировали три расположенных рядом объекта – Керченский морской рыбный порт, содовый терминал и Керченский морской торговый порт (рис. 5, б).

У западного берега Керченской бухты, между торговым и рыбным портами г. Керчь, расположен содовый терминал, который был введен в эксплуатацию в конце прошлого столетия и никогда не исследовался в качестве источника загрязнения водной среды. Этот объект как источник загрязнения вод был обнаружен нами на основе визуальных наблюдений: практически каждый раз в ходе съемок в Керченской бухте в районе содового терминала на поверхности моря отмечалось матовое пятно. Единичные зондирования на данном участке фиксировали локальный максимум концентрации ОРОВ и ОБВ в поверхностном слое, а профили этих величин имели форму, типичную для загрязненных участков.

Впадающие в западную часть Керченской бухты небольшие загрязненные речки Мелек-Чесме, Булганак, Джарджава также представляют собой достаточно серьезные объекты антропогенного воздействия на водную среду. Проявление их стока в полях концентрации ОРОВ рассмотрено в работе [2].

Со стоком речки Булганак, которая протекает по промышленному району г. Керчь и впадает в акваторию Керченского морского торгового порта, мы связываем загрязнение портовой и припортовой акваторий антропогенным ОРОВ. Так, в припортовой акватории в русле подходного судоходного канала нами была зафиксирована максимальная для всего рассматриваемого региона концентрация ОРОВ, 210–250 *QSU* [19].

Линзы 10 и 11, которые расположены в районе паромной переправы, на подходах к портам «Крым» и «Кавказ» (рис. 5, 6), наблюдались в полях концентрации обеих анализируемых величин по результатам всех съемок акватории северной узкости Керченского пролива. Нами также отмечено заметное увеличение фонового содержания ОВВ (до ~10 мг/л) в этой узкости в периоды интенсивной работы керченской паромной переправы.

Линза 12 была обнаружена нами у м. Белый (юго-восточная часть Керченской бухты), в районе нефтяного терминала (рис. 4, *b*; 5, 6). Она проявлялась во всей толще вод. Горизонтальный масштаб этого образования составлял ~3–4 мили. Максимум концентрации ОРОВ 70 *QSU* и ОВВ 23 мг/л при фоновых значениях 30 *QSU* и 13 мг/л соответственно наблюдался на горизонте 3 м.

Наиболее масштабная линза 13, зафиксированная нами в северной части Керченской бухты, была вынесена в пролив из Азовского моря. Ее происхождение и структура полей концентрации ОРОВ, ОВВ и растворенных нефтепродуктов детально рассмотрены в работе [20] (рис. 4, *b*; 5, 6).

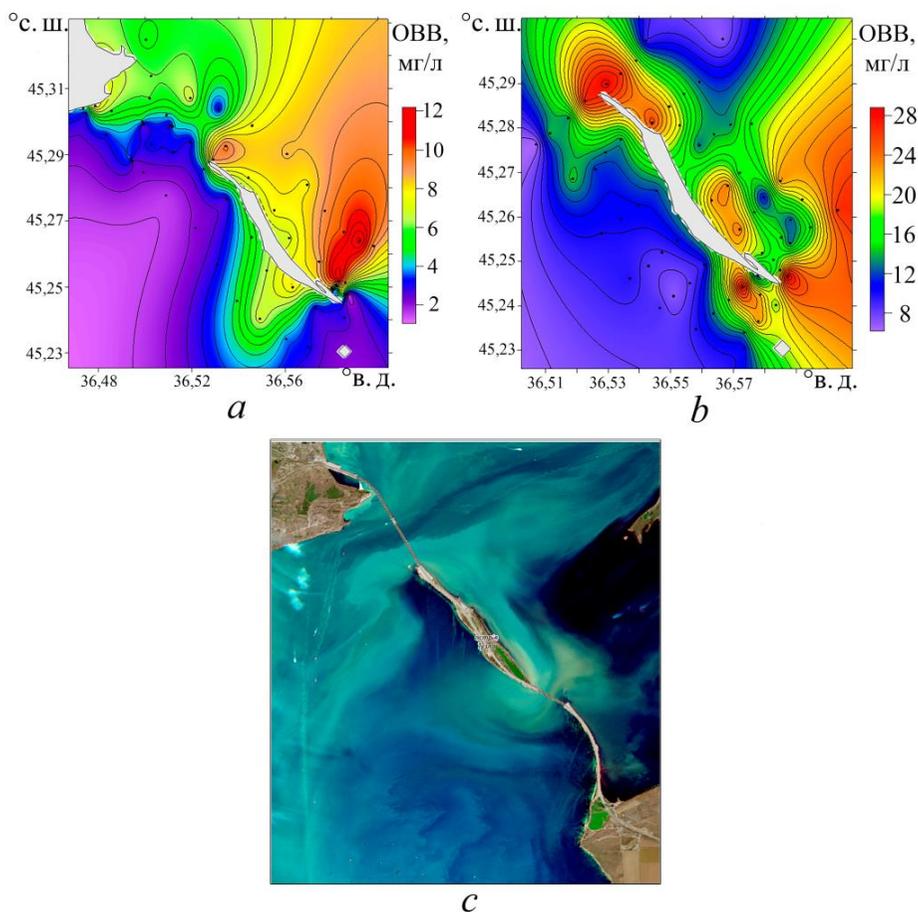
Общая площадь линз, содержащих ОРОВ и ОВВ антропогенной природы, оказалась равной ~10–15% от площади водного зеркала пролива, что указывает на существенную антропогенную нагрузку на водную среду региона.

Серьезный антропогенный источник ОВВ возник в Керченском проливе вследствие построенной осенью 2003 г. тузлинской дамбы и последующего искусственного углубления дна в образовавшейся промоине (рис. 6). Это привело к обвалу восточной части острова [21] и обеспечило поступление в водную среду огромного количества взвеси в результате интенсивной эрозии берега и дна. Влияние указанного источника распространилось на значительную часть акватории пролива.

По данным ЮгНИРО и сообщениям Гидрографической службы, в течение первых лет после окончания строительства дамбы в Керченском проливе наблюдалась резкая интенсификация системы течений и потоков взвеси, активизировались процессы заносимости бухт, портов, припортовых акваторий, судоходных каналов. Примерно через 5–10 лет, прошедших после окончания строительства дамбы, когда морфометрические характеристики берега и дна о. Тузла более или менее стабилизировались, тузлинская промоина оставалась весомым источником ОВВ. Даже при слабом и умеренном ветре концентрация ОВВ в районе острова в разы и на порядок превосходила фоновые значения (рис. 7, *a*, *b*). Тогда, как до строительства дамбы, воды в этой части пролива отличались максимальной прозрачностью и, согласно результатам многолетних гидрохимических исследований [1], были наиболее чистыми в регионе и соответствовали классу II качества морских вод.

Несмотря на значительно возросшую концентрацию ОВВ, обусловленную влиянием дамбы, в концентрации ОРОВ в районе о. Тузла не было выявлено антропогенной составляющей в поле этого вещества. То есть тузлинская промоина в отличие от всех рассмотренных выше объектов антропогенной нагрузки не представляла собой источник антропогенного ОРОВ.

К наиболее мощным источникам (видам деятельности), загрязняющим воды океанов, морей, эстуарийных зон, относят судоходство и дноуглубление с последующим дампингом изъятых грунтов [22–25]. Ниже приведены сведения, которые подтверждают данное положение для исследуемого региона.



Р и с. 7. Распределение концентрации ОБВ в поверхностном слое вод в районе о. Тузла при слабом и умеренном южном ветре в апреле 2008 г. – *a* и в апреле 2009 г. – *b*; спутниковый снимок района о. Тузла от 5 октября 2020 г. (спутник *Sentinel-2 L2A* (4, 3, 2)) – *c*

Fig. 7. Distribution of TSM concentration in the sea surface layer in the region of Tuzla Island during weak and moderate south wind in April 2008 – *a*, and in April 2009 – *b*; satellite image of the Tuzla Island area on October 05, 2020 (*Sentinel-2 L2A* (4, 3, 2)) – *c*

Так, отобранные пробы воды из кильватерного следа движущихся по суходонным каналам крупнотоннажных (30–40 тыс. т) океанских судов содержали до 270–300 мг/л ОБВ (на два порядка выше фона) – максимум концентрации этого вещества за все время экспедиционных исследований. Согласно визуальным наблюдениям, в нем всплывали и погружались комья грунта, фрагменты промышленного снаряжения (разломанные кухтыли, канаты, куски дели, обломки деревьев и досок, вырванная с корнем трава, мусор различного вида, в том числе пластиковый).

Кильватерный след крупнотоннажных судов – мощный турбулизированный поток, который расширяется за движущимся судном и быстро распространяется к берегам пролива, взмучивая значительную часть его акватории. К тому же кроме крупнотоннажных в Керченском проливе постоянно перемещаются десятки меньших судов различного типа и назначения.

В результате дноуглубительных работ (вторых по значимости после судоходства) в Керченском морском торговом порту, которые проводились летом 2000 г. [19], наблюдался значительный рост концентрации ОВВ (210–260 мг/л) в портовой и прилегающей акваториях.

Исходя из приведенной выше характеристики источников загрязнения вод пролива ОРОВ и ОВВ антропогенной природы, а также результатов исследования загрязнения его акватории, полученных ранее в работах [1–5], по степени значимости их можно представить в следующей последовательности: основные источники загрязнения, связанные с эксплуатацией флота и объектов обеспечивающей инфраструктуры, судоходство и судоходные каналы; дноуглубительные работы и дампинг изъятых грунтов; порты, площадки рейдовой перегрузки, грузовые терминалы, грунтовые свалки, а также загрязненные воды Азовского моря, тузлинская промоина, очистные сооружения г. Керчь, выпадающие в пролив загрязненные речки.

Сравнение полученного нами результата с известными исследованиями загрязнения вод региона показало хорошее сходство. Практически все линзы, содержащие ОРОВ и ОВВ антропогенной природы, соответствуют загрязненным участкам, которые были выявлены и изучались в рамках многолетнего мониторинга ЮгНИРО [2].

Исключение составили три (не обнаруженных нами вследствие отсутствия данных) участка и соответствующих объекта загрязнения, которые расположены в районе Таманского п-ова, – дамба, нефтяной терминал и порт Тамань (рис. 6). Эти объекты как источники загрязнения вод и грунтов пролива исследованы ЮгНИРО [2], а порт Тамань – ИО РАН [5]. В частности, анализируя распространение взвеси, генерируемой в процессе углубления дна портовой акватории и последующего дампинга изъятых грунтов в море, авторы работы [5] определили эти виды деятельности в качестве наиболее мощного источника, загрязняющего антропогенным взвешенным веществом южную часть Керченского пролива и черноморское предпроливье.

Заключение

На основе анализа данных экспедиций, проведенных в 2001–2014 гг., рассмотрена структура полей концентрации ОРОВ и ОВВ антропогенной природы в Керченском проливе.

Показано, что анализируемые вещества локализованы в виде отдельных линз с повышенной относительно фона концентрацией. Распределение ОРОВ(z) и ОВВ(z) имеет характерную интрузионную форму в отличие от гладких профилей этих величин в незагрязненных водах. Диаграммы эмпирического распределения концентрации этих веществ в верхнем слое вод подобны. Они одномодальны, правоасимметричны и имеют примерно одинаковую повторяемость моды.

Сходство структурных признаков антропогенных полей концентрации ОРОВ и ОВВ, а также эмпирического распределения концентрации этих веществ и совпадение локаций – доказательство того, что анализируемые образования формируются под воздействием сходных антропогенных факторов и объектов, загрязняющих воды пролива.

Всего нами обнаружено 13 линз с горизонтальным масштабом 1–6 миль, содержащих ОРОВ и ОВВ антропогенной природы, общей площадью 10–15% от площади водного зеркала пролива. Также определены их источники – объекты и виды хозяйственно-промышленной деятельности.

Отдельно рассмотрен новообразованный источник антропогенной взвеси – тузлинская промоина. Показано, что в отличие от всех рассмотренных объектов антропогенной нагрузки тузлинская промоина не представляла собой источник антропогенного ОРОВ. В течение первых лет после окончания строительства дамбы антропогенная взвесь из промоины распространялась на значительную часть акватории пролива, что вызвало интенсификацию процессов заносимости бухт, судоходных каналов, припортовых акваторий, портов. По прошествии 5–10 лет после ее возникновения промоина оставалась серьезным источником антропогенной взвеси, обеспечивая концентрацию ОВВ в районе Тузлы на порядок выше окружающего фона.

Установлено, что источники загрязнения исследуемой акватории в основном связаны с эксплуатацией флота и объектов обеспечивающей инфраструктуры. Это судоходство и судоходные каналы; дноуглубительные работы и дам্পинг изъятых грунтов; порты, площадки рейдовой перегрузки, грузовые терминалы; грунтовые свалки. Кроме этих источников также выделены проникающие в Керченский пролив загрязненные воды Азовского моря, тузлинская промоина, очистные сооружения г. Керчь, сток выпадающих в Керченскую бухту загрязненных речек.

Сравнение полученного результата с известными исследованиями загрязнения вод региона показало хорошее сходство. Практически все выявленные нами линзы антропогенной природы соответствуют загрязненным участкам, которые были определены и изучались сотрудниками ЮгНИРО на основе гидрхимического анализа в рамках многолетнего мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрохимический режим и загрязнение вод Керченского пролива в 1979–2009 гг. / С. А. Шибаява [и др.] // Морський екологічний журнал. 2011. Т. 10, № 4. С. 77–87. EDN SZIOMR.
2. Основные объекты антропогенного воздействия на водную среду Керченского пролива по данным многолетних гидрооптических и гидрохимических исследований / П. Д. Ломакин [и др.] // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 4. С. 75–85. EDN DEWBGD. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2020-4-75-85>
3. Котельянец Е. А., Коновалов С. К. Тяжелые металлы в донных отложениях Керченского пролива // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 50–60. EDN TMJXGF.
4. Оценка загрязнения Керченского пролива и прилегающей акватории Черного моря по данным натурных измерений 2019–2020 гг. / П. О. Завьялов [и др.] // Океанология. 2022. Т. 62, № 2. С. 194–203. EDN YHPEH1. <https://doi.org/10.31857/S0030157422020174>
5. Керченский пролив и его техногенное загрязнение: возможности оптического и радиолокационного дистанционного зондирования / А. Ю. Иванов [и др.] // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25, № 8. С. 21–27. EDN UXJJIL. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-8-21-27>
6. *Eisma D. Suspended Matter in the Aquatic Environment.* Berlin, Heidelberg : Springer, 2011. 315 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77722-6>

7. Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf / E. Boss [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. Vol. 106, iss. C5. P. 9499–9507. <https://doi.org/10.1029/2000jc900008>
8. Fluorescence properties of dissolved organic matter in coastal Mediterranean waters influenced by a municipal sewage effluent (Bay of Marseilles, France) / M. Tedetti [et al.] // *Environmental Chemistry*. 2012. Vol. 9, iss. 5. P. 438–449. <https://doi.org/10.1071/en12081>
9. High-frequency in situ optical measurements during a storm event: Assessing relationships between dissolved organic matter, sediment concentrations, and hydrologic processes / J. F. Saraceno [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2009. Vol. 114, iss. G4. G00F09. <https://doi.org/doi:10.1029/2009JG000989>
10. Seeing the light: The effects of particles, dissolved materials, and temperature on in situ measurements of DOM fluorescence in rivers and streams / B. D. Downing [et al.] // *Limnology and Oceanography: Methods*. 2012. Vol. 10, iss. 10. P. 767–775. <https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.767>
11. Пугач С. П., Пунко И. И. Динамика растворенного окрашенного органического вещества на шельфе Восточно-Сибирского моря // *Доклады Академии наук*. 2012. Т. 447, № 6. С. 671. EDN PNSDQJ.
12. Chapman P. M., Hayward A., Faithful J. Total Suspended Solids Effects on Freshwater Lake Biota Other than Fish // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2017. Vol. 99, iss. 5. P. 423–427. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2154-y>
13. Environmental impact and recovery at two dumping sites for dredged material in the North Sea / J. Stronkhorst [et al.] // *Environmental Pollution*. 2003. Vol. 124, iss.1. P. 17–31. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00430-X](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00430-X)
14. Effects of long-term dumping of harbor-dredged material on macrozoobenthos at four disposal sites along the Emilia-Romagna coast (Northern Adriatic Sea, Italy) / R. Simonini [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2005. Vol. 50, iss. 12. P. 1595–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.06.031>
15. Ecological evaluation of an experimental beneficial use scheme for dredged sediment disposal in shallow tidal waters / D. van der Wal [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. Vol. 62, iss. 1. P. 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.09.005>
16. Impact of dredged-material disposal on soft-bottom communities in a recurrent marine dumping area near to Guadalquivir estuary, Spain / I. Donázar-Aramendía [et al.] // *Marine Environmental Research*. 2018. Vol. 139. P. 64–78. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.05.010>
17. Петренко О. А., Себех Л. К., Фаизук Д. Я. Некоторые экологические последствия дампинга в Черном море грунтов, извлеченных при дноуглублении в Керченском проливе // *Водные ресурсы*. 2002. Т. 29, № 5. С. 622–635. EDN VOPYGT.
18. Tri D. Q., Kandasamy J., Don N. C. Quantitative Assessment of the Environmental Impacts of Dredging and Dumping Activities at Sea // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, iss. 8. 1703. <https://doi.org/10.3390/app9081703>
19. Ломакин П. Д. Влияние дноуглубительных работ и грунтовых свалок на экологическую ситуацию в Керченском проливе // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 2. С. 160–170. EDN XGVGAJ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-160-170>
20. Гидрологические условия и характеристика загрязнения вод Керченского пролива в мае 2005 г. по данным контактных измерений и спутниковых наблюдений / П. Д. Ломакин [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 2006. № 4. С. 27–34. EDN HUZYLH.
21. Степаняк Ю. Д., Баширцева Е. В. Морфология и литодинамики о. Коса Тузла по данным дистанционных наблюдений // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2009. № 20. С. 100–107. EDN XCIVOV.
22. Zhang C., Yang J.-q. Prevention and control of ship-source pollution in the Arctic shipping routes: challenges and countermeasures // *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31, iss. 28. P. 40436–40444. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30817-w>

23. *Fan L., Yang H., Zhang X.* Targeting the Effectiveness Assessment of the Emission Control Policies on the Shipping Industry // *Sustainability*. 2024. Vol. 16, iss. 6. 2465. <https://doi.org/10.3390/su16062465>
24. *Dredging and Mining Operations, Management, and Environmental Impacts / H. A. Aziz [et al.]* // *Industrial Waste Engineering. Handbook of Environmental Engineering / Eds. L. K. Wang, M. S. Wang, Y. T. Hung.* Cham : Springer, 2023. P. 333–396. (*Handbook of Environmental Engineering Series ; vol. 28*). https://doi.org/10.1007/978-3-031-46747-9_8
25. *Wang X. H.* Dynamic Response of Coasts and Estuaries to Human Impacts. Problems and Solutions. Cham : Springer Nature, 2024. 118 p. (*Coastal Research Library Series ; vol. 40*).

Об авторах:

Ломакин Павел Демьянович, ведущий научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: V-7761-2017**, **Scopus Author ID: 6701439810**, **SPIN-код: 5419-9884**, p_lomakin@mail.ru

Чепыженко Анна Алексеевна, младший научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-0789-4719**, **WOS ResearcherID: F-9651-2014**, **Scopus Author ID: 56536937200**, **SPIN-код: 4231-8711**, annachep87@yandex.ru

Чепыженко Алексей Ильич, старший научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, **ORCID ID: 0000-0002-6763-7140**, **WOS ResearcherID: AAG-7929-2020**, **Scopus Author ID: 6504344211**, **SPIN-код: 3599-9653**, ecodevice@yandex.ru