

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВОД НА ПРИУСТЬЕВЫХ УЧАСТКАХ КРЫМСКИХ РЕК БЕЛЬБЕК И КАЧА В МЕЖЕНЬ *

Ломакин П. Д.¹, Чепыженко А. И.¹, Попов М. А.²

¹Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
Севастополь, Российская Федерация,

²ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: p_lomakin@mail.ru

Аннотация: На основе данных двух экспедиций, проведённых Морским гидрофизическим институтом в 2019 и 2020 гг., проанализированы особенности структуры полей температуры, солёности, концентрации общего взвешенного вещества и концентрации окрашенного растворённого органического вещества на приустьевых участках крымских рек Бельбек и Кача в межень. Показано, что структура термохалинного поля была типичной для тёплого полугодия и не содержала признаков антропогенной нагрузки. В поле солёности в устьях исследуемых рек обнаружены слабодисперсизованные стоковые линзы. В полях концентрации общего взвешенного вещества и концентрации окрашенного растворённого органического вещества выявлена весовая антропогенная составляющая, определявшаяся влиянием сточных вод посёлка Любимовка и стоком изучаемых рек. В приустьевой области обеих рек шириной около 200 м и глубиной 2–5 м, которую можно считать составным элементом естественного маргинального фильтра, наблюдалось фронтальное распределение концентрации общего взвешенного вещества и концентрации окрашенного растворённого органического вещества. В этой барьерной зоне оседало примерно 50 % общего взвешенного вещества и задерживалось около 20 % окрашенного растворённого органического вещества от содержания этих веществ в непосредственной близости к устьям рек Бельбек и Кача.

Ключевые слова: температура, солёность, общее взвешенное вещество, растворённое органическое вещество, маргинальный фильтр, Крым

Введение

Примерно с 90-х годов прошлого столетия до настоящего времени ведущими научно-исследовательскими учреждениями г. Севастополя преимущественно гидрохимическими методами ведутся мониторинговые исследования состояния прибрежных вод Севастопольского региона.

Результаты этих исследований, отражённые в многочисленных статьях, обобщены в работах [Гидролого-гидрохимический ... , 2006; Грузинов и др., 2019], где представлено описание основных источников, загрязняющих севастопольские бухты и открытые участки взморья.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ МГИ по темам FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовой зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования» и FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений», а также в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (2024–2026 гг.), регистрационный номер 124022400152-1.

По мнению авторов указанных работ, им удалось выявить далеко не все источники загрязнения при исследовании отдельных прибрежных участков изучаемого региона. Один из таких участков — обширная (в рамках региона) акватория северной части взморья, между мысами Коса Северная и Лукулл, куда впадают реки Бельбек и Кача.

Известные, но малоизученные источники загрязнения прибрежных акваторий Крыма связывают со стоком крымских рек, которые традиционно считаются загрязнёнными [Гидрогеология, 1970; Поверхностные водные ... , 2004]. Влияние стока рек Бельбек и Кача на состояние и качество вод приустьевых акваторий практически не исследовано.

Цель настоящей статьи — выявить особенности структуры полей температуры, солёности, концентрации общего взвешенного вещества (ОВВ) и окрашенного растворённого органического вещества (ОРОВ) на приустьевых участках крымских рек Бельбек и Кача в межень; выделить антропогенную составляющую концентрации данных веществ и определить загрязнённые ими участки; оценить линейный горизонтальный масштаб естественных маргинальных фильтров рассматриваемых рек и степень трансформации ОВВ и ОРОВ в этих барьерных зонах.

Отметим, что ОВВ и ОРОВ относят к ряду эффективных показателей загрязнения прибрежных вод океанов, морей и пресных водоёмов [Eisma, 2011; Boss et al., 2001; Tedetti et al., 2012].

Исследуемая акватория расположена на севере севастопольского взморья, между мысом Коса Северная и посёлком Кача. Сюда впадают реки Бельбек и Кача, а также находится посёлок Любимовка (рис. 1).

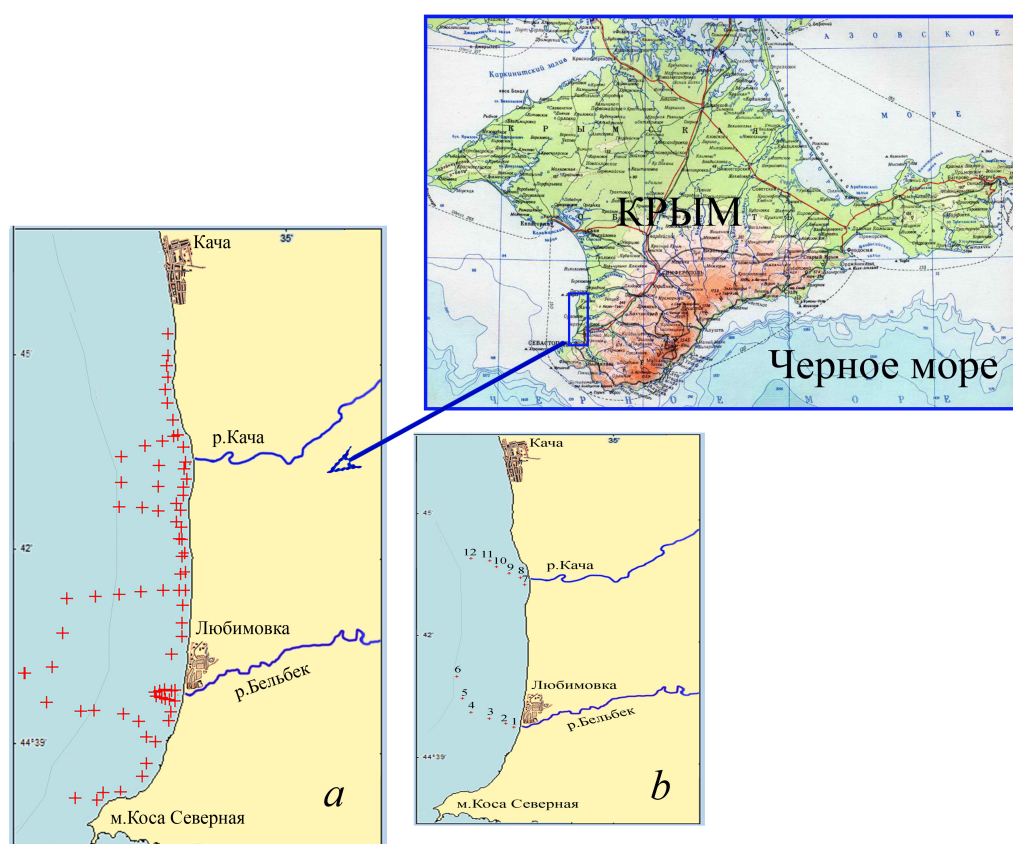


Рис. 1. Исследуемая акватория. Схема станций экспедиции, проведённой в июне 2020 г. (a), и фрагмент съёмки, выполненный в сентябре 2019 г. (b)

Исходные данные и методы исследования

Для анализа использованы данные двух экспедиций, проведённых Морским гидрофизическим институтом с участием авторов настоящей статьи. Основной массив исходной информации получен в ходе экспедиции, предпринятой 7 июня 2020 г., по схеме из 54 дрейфовых станций (рис. 1а). Для оценки трансформации ОБВ и ОРОВ в приустьевой зоне рек Бельбек и Кача привлечены данные фрагмента съёмки, реализованной 19 сентября 2019 г. (данные разрезов от устья рек Кача и Бельбек — в море) (рис. 1б).

Забортные работы проведены с борта маломерного судна осадкой 1,7 м. Диапазон исследованных глубин 2–57 м.

Весь массив исходной информации получен при помощи оптического биофизического зондирующего комплекса «Кондор» («НПП «Аквастандарт», ТУ 431230-006-00241904-2015, код ТН ВЭД ЕАЭС 9027 50 000 0, сертификат ЕАЭС RU Д-RU.ЭМ03.А.00096/19) (Hydrooptics Ltd. Development. Creation. Research. URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 05.06.2025 г)).

Температура, солёность, концентрация ОБВ и ОРОВ в водной толще фиксировались синхронно в зондирующем режиме *in situ* с шагом по глубине 0,1 м. Точность определения этих величин составила: температура $\pm 0,01$ °С, солёность $\pm 0,005$ ЕПС, ОБВ $\pm 0,2$ мг/л, ОРОВ $\pm 0,3$ мг/л.

При выделении участков, загрязнённых ОБВ и ОРОВ антропогенной природы, мы использовали простой метод [Chapman, Hayward, Faithful, 2017], широко применяемый в практике экспедиционных исследований прибрежных акваторий. Его суть заключается в следующем: загрязнённым участкам акватории соответствуют локальные максимумы концентрации в поле исследуемой величины. Степень загрязнения оценивалась путём сравнения фактической концентрации изучаемого вещества и концентрации этого вещества с минимальной антропогенной составляющей — природной нормой. В прибрежных водах Севастопольского региона, согласно [Ломакин, Чепыженко, 2022], природная норма для ОБВ равна 0,8 мг/л и 2 мг/л для ОРОВ.

Сведения о погоде в районе Севастополя взяты с сайта [Расписание погоды].

Обсуждение результатов

Данные анализируемых экспедиционных исследований получены в маловетреную сухую погоду в межень на реках Кача и Бельбек.

Согласно оценкам авторов [Гидрогеология, 1970; Поверхностные водные ... , 2004], среднегодовой расход р. Бельбек — 2,75 м³/с, р. Кача — 1,69 м³/с. В течение основного времени года (в межень) устье каждой из этих рек представляет собой ручей с расходом порядка 0,1 м³/с. В паводки речные устья существенно расширяются, а расход увеличивается до 20 м³/с и более.

Ниже приведено описание структуры полей температуры, солёности, концентрации ОБВ и ОРОВ в межень на анализируемом участке севастопольского взморья.

Поле температуры воды. Структура поля температуры воды была двухслойной, типичной для тёплого времени года, и характеризовалась следующими параметрами: наличием верхнего квазиоднородного слоя толщиной около 35 м и температурой 17–19 °С, который подстилался слоем скачка толщиной около 10 м и вертикальным градиентом 0,5 град/м и придонным слоем с температурой 9,5–11,5 °С (рис. 2).

Поле солёности. Солёность изменялась в небольшом диапазоне (18,12–18,35 ЕПС), который, вероятно, типичен для межени. Квазиоднородный по температуре слой характеризовался повышенной солёностью (18,22–18,35 ЕПС), солёность придонного слоя была ниже (18,12–18,15 ЕПС). Судя по горизонтальному распределению солёности, в верхнем слое северной и западной частей полигона наблюдались высокосолёные воды открытого моря. В придонном слое с юга распространялись менее солёные воды из Севастопольской бухты (рис. 3).

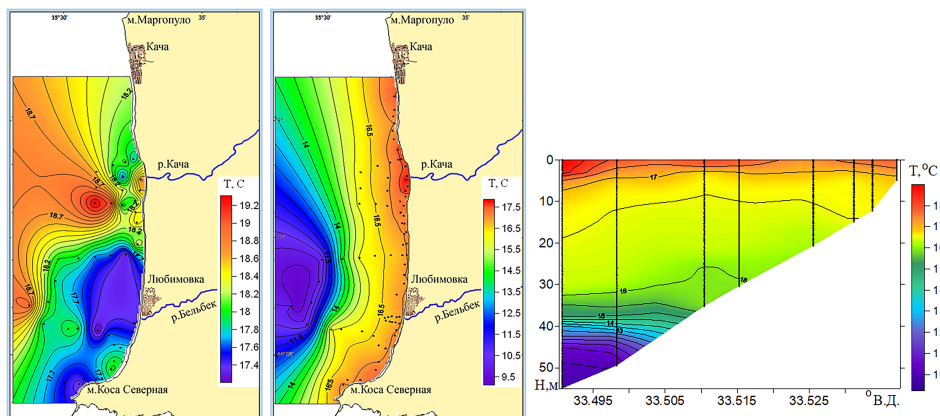


Рис. 2. Распределение температуры воды (°C) в поверхностном слое (а), у дна (б), на разрезе по нормали к берегу между устьями рек Кача и Бельбек (с) в июне 2020 г.

На приустьевых участках, в верхнем слое в поле солёности, видны стоковые линзы рек Кача и Бельбек с перепадом солёности относительно фона в 0,02–0,05 ЕПС. Диаметр стоковой линзы р. Кача ~250–300 м, линзы р. Бельбек ~100–150 м. Ещё 3 линзы распреснённых вод с диаметром около 100–200 м и перепадом солёности 0,02 ЕПС отмечены у берега, на участке от мыса Коса Северная до устья р. Кача. Их происхождение также может быть связано с речным стоком (рис. 3а).

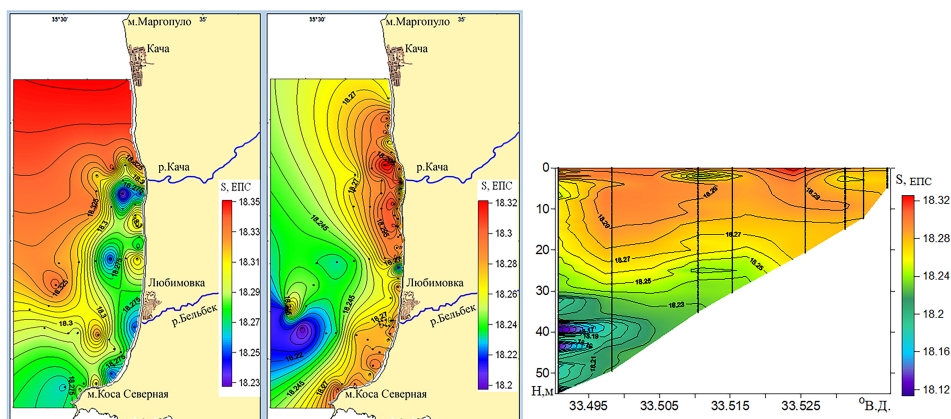


Рис. 3. Распределение солёности (ЕПС) в поверхностном слое (а), у дна (б), на разрезе по нормали к берегу между устьями рек Кача и Бельбек (с) в июне 2020 г.

Поле концентрации ОВВ. Анализ структуры поля концентрации ОВВ (рис. 4) выявил качественное отличие от структуры термохалинного поля, которое, как правило, не реагирует на антропогенное воздействие (рис. 2, 3).

В южной половине полигона наблюдалась масштабная линза вод площадью 3–4 кв. мили явно антропогенного происхождения, с концентрацией ОВВ 1,8–3,5 мг/л, что примерно в 2–4 раза превосходило природную норму. Наличие в пределах этого образования трёх хорошо выраженных локальных максимумов свидетельствует о загрязнении данного участка антропогенной взвесью несколькими источниками (рис. 4а, 4б).

Этими источниками могут быть сточные воды посёлка Любимовка (наиболее весомый фактор), сток р. Бельбек, а также взвесь, поступающая в море вследствие размыва мыса Коса Северная. Известно [Ocean renewable ... , 2012], что мысы аккумулируют волновую энергию, формируя локальные очаги эрозии береговой линии.

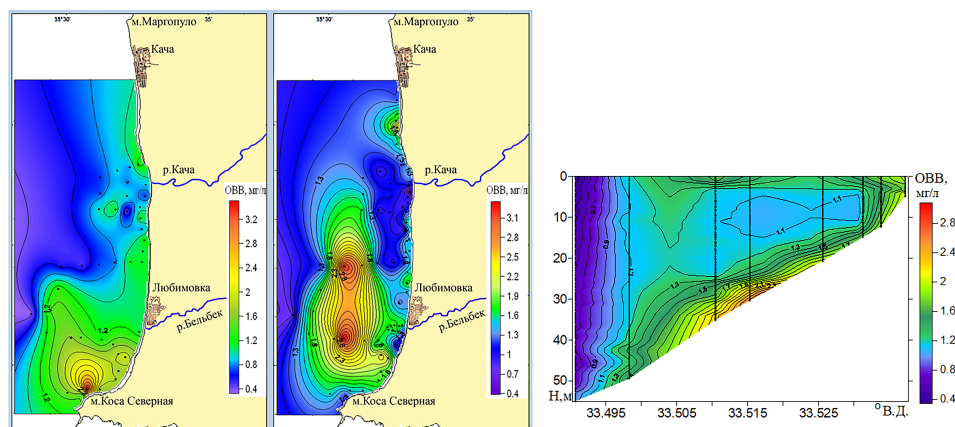


Рис. 4. Распределение концентрации ОВВ (мг/л) в поверхностном слое (а), у дна (б), на разрезе по нормали к берегу между устьями рек Кача и Бельбек (с) в июне 2020 г.

В приустьевой области р. Кача, на фоне вод открытой части моря с низким природным содержанием взвеси (0,4–0,8 мг/л), выделялись отдельные стоковые линзы диаметром 100–200 м и концентрацией антропогенной взвеси 1,8–2,5 мг/л, что в 2–3 раза выше природной нормы (рис. 4а, 4б).

Поле концентрации ОВВ стратифицировано. Максимальная концентрация этого вещества с весомым вкладом антропогенной составляющей приходится на придонный слой. На участках исследуемой акватории с глубинами более 50 м доля антропогенной составляющей становится незначительной (рис. 4с).

Поле концентрации ОРОВ. Структура поля концентрации этого вещества (рис. 5) аналогична, за некоторым исключением, структуре поля концентрации ОВВ (рис. 4).

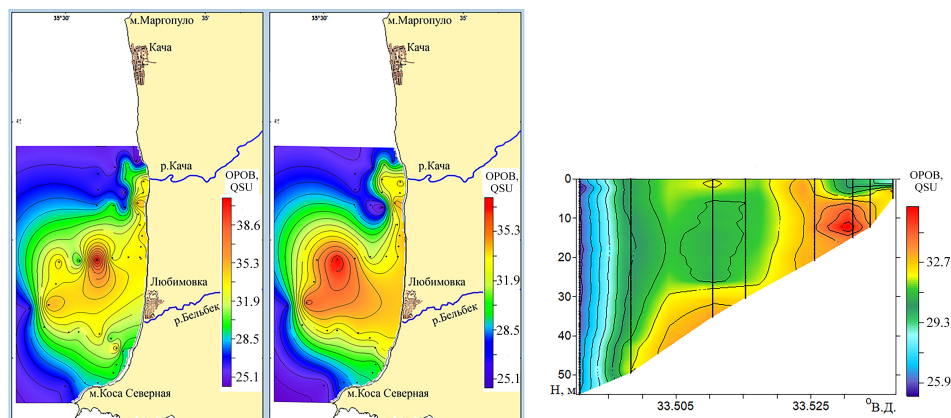


Рис. 5. Распределение концентрации ОРОВ (мг/л) в поверхностном слое (а), у дна (б), на разрезе по нормали к берегу между устьями рек Кача и Бельбек (с) в июне 2020 г.

Основное отличие — воды всей рассматриваемой акватории содержали ОРОВ с антропогенной составляющей. Концентрация этого вещества изменялась в интервале 2,4–3,3 мг/л, что превышало природную норму в 1,2–1,6 раза.

В поле ОРОВ нет локального максимума у мыса Коса Северная. То есть наиболее масштабная линза вод, содержавшая ОРОВ антропогенного происхождения, была обусловлена сточными водами посёлка Любимовка и стоком р. Бельбек. В поле концентрации ОРОВ отчётливо видна стоковая линза р. Кача (рис. 5а, 5б).

На рис. 6 показано распределение концентрации ОБВ и ОРОВ на разрезах, в приустьевых областях рек Бельбек и Кача (рис. 1b). Разрезы были выполнены в сентябре 2019 г. в сухую погоду в условиях умеренного северного ветра, в межень. Из-за осадки судна 1,7 м наиболее близкие к устьям мелководные станции располагались в точках на глубине 2 м, на удалении ~5 м от уреза воды. Наиболее удалённые мористые станции находились в точках с отметками 28 и 22 м соответственно. Длина разрезов в районе устья р. Бельбек — 0,7 мили, в районе устья р. Кача — 0,5 мили.

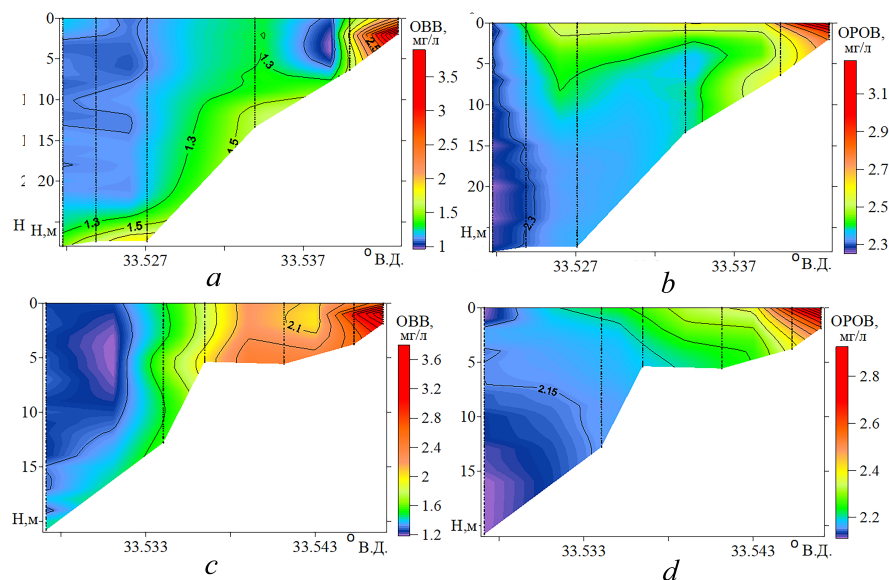


Рис. 6. Распределение ОБВ (мг/л) (a) и ОРОВ (мг/л) (b) на разрезе устье р. Бельбек — море; эти же характеристики соответственно (c, d) на разрезе устье р. Кача — море в сентябре 2019 г.

Приведённые выше сведения позволили получить представление о геометрических размерах мористой части естественного маргинального фильтра исследуемых рек в межень и оценить степень седиментации ОБВ и трансформации ОРОВ в этой барьерной зоне.

В частности, выявлено, что приустьевая область обеих рек шириной около 200 м и глубиной 2–5 м выделяется фронтальным распределением концентрации ОБВ и ОРОВ с максимальным горизонтальным градиентом.

Для устья р. Бельбек горизонтальный градиент концентрации ОБВ и ОРОВ оказался равным соответственно 1,3 мг/л на 100 м и 0,3 мг/л на 100 м. Для устья р. Кача горизонтальный градиент этих величин составил 0,8 мг/л на 100 м и 0,3 мг/л на 100 м (рис. 6).

Судя по разности концентраций ОБВ и ОРОВ на границах мористой части естественного маргинального фильтра, на прибрежном участке устья р. Бельбек шириной 200 м и глубиной 2–5 м осело 63 % ОБВ и задержалось 19 % ОРОВ от содержания этих веществ в прибрежной мелководной зоне глубиной 0–2 м.

На таком же приустьевом участке р. Кача осело 45 % ОБВ и задержалось 23 % ОРОВ от содержания этих веществ в прибрежной мелководной зоне глубиной 0–2 м.

То есть фронтальные образования в полях концентрации ОБВ и ОРОВ, выявленные на приустьевых участках рек Бельбек и Кача, представляют собой составной элемент естественного маргинального фильтра рассматриваемых рек. На этих фронтах осаждаются примерно 50 % взвешенных веществ и задерживается около 20 % растворённых органических веществ от их количества, содержащегося вблизи устьев.

Глубже 5 м ОБВ распространялось в придонном слое, а ОРОВ — в поверхностном. Относительный вклад антропогенной составляющей в концентрации этих веществ постепенно уменьшался, но полностью не исчез (рис. 6).

Заключение

На основе данных экспедиций, проведённых Морским гидрофизическим институтом в сентябре 2019 г. и в июне 2020 г., проанализированы особенности структуры полей температуры, солёности, концентрации общего взвешенного вещества (ОВВ) и концентрации окрашенного растворённого органического вещества (ОРОВ) на приустьевых участках крымских рек Бельбек и Кача в межень.

Структура термохалинного поля была типичной для тёплого полугодия. В поле солёности в устьях исследуемых рек обнаружены слабодисперсизованные стоковые линзы с горизонтальным масштабом около 300 м в устье р. Кача и 150–200 м в устье р. Бельбек.

В поле концентрации ОВВ и ОРОВ выявлена существенная антропогенная составляющая. Показано, что основные источники ОВВ антропогенной природы обусловлены сточными водами посёлка Любимовка, стоком изучаемых рек и взвесью, поступающей в водную среду вследствие размыва мыса Коса Северная. Основные источники ОРОВ антропогенного происхождения представлены сточными водами пос. Любимовка и стоком загрязнённых рек Кача и Бельбек.

На преобладающей части исследуемой акватории фактическая концентрация ОВВ в 1,5–4 раза превышала природную норму. ОРОВ антропогенного происхождения с концентрацией в 1,2–1,6 раза выше природной наблюдалось на всей рассмотренной акватории.

В приустьевой области рек Бельбек и Кача глубиной 2–5 м, в полях концентрации ОВВ и ОРОВ, обнаружены фронтальные образования шириной около 200 м, которые можно считать составными элементами естественного маргинального фильтра устья каждой реки. Показано, что в этих барьерных зонах осаждается примерно 50 % взвешенных веществ и задерживается около 20 % растворённых органических веществ от их количества, содержащегося вблизи устьев.

Список литературы

1. Гидрогеология СССР. Т. VIII. Крым / М-во геологии УССР, Укр. науч.-исслед. геол.-развед. ин-т ; ред. В. Г. Ткачук. – Москва : Недра, 1970. – 364 с.
2. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / НАН Украины, Мор. гидрофиз. ин-т ; Иванов В. А., Овсяный Е. И., Репетин Л. Н. [и др.]. – Севастополь, 2006. – 90 с. – (Препринт/МГИ). – URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buh_ty_2006.pdf (дата обращения: 11.05.2025).
3. Грузинов В. М., Дьяков Н. Н., Мезенцева И. В., Мальченко Ю. А., Жохова Н. В., Коршенко А. Н. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района // Океанология. – 2019. – Т. 59, № 4. – С. 579–590. – <https://doi.org/10.31857/S003-1574594579-590>
4. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И. Структура полей океанологических величин в зоне апвеллинга у Гераклеийского полуострова (Крым) в августе 2019 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2022. – № 1. – С. 31–41. – <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2022-1-31-41>
5. Поверхностные водные объекты Крыма : справочник / сост.: Лисовский А. А. [и др.] ; под ред. Тимченко З. В. – Симферополь : Рескомводхоз, 2004. – С. 12, 22, 25.
6. Расписание погоды : [сайт]. – 2004–2025. – URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 05.06.2025).
7. Boss E., Pegau W. S., Zaneveld J. R. V., Barnard A. H. Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf // Journal of Geophysical Research. – 2001. – Vol. 106, № C5. – P. 9499–9507.
8. 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. 4. – P. 423–427. – <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2154-y>

9. Eisma D. Suspended matter in the aquatic environment. – Berlin [et al.] : Springer, 2011. – 315 p. – <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77722-6>
10. Ocean renewable energy: 2015–2050. An analysis of ocean energy in Australia / Commonwealth Sci. and Industr. Res. Org. – [S. l.] : CSIRO, 2012. – 209 p. – URL: <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP113441&dsid=DS2> (accessed: 11.05.2025).
11. Tedetti M., Longhitano R., Garcia N., Guigue C., Ferretto N., Goutx M. Fluorescence properties of dissolved organic matter in coastal Mediterranean waters influenced by a municipal sewage effluent (Bay of Marseilles, France) // Environmental Chemistry. – 2012. – Vol. 9, iss. 5. – P. 438–449. – <https://doi.org/10.1071/EN12081>

FEATURES OF THE WATER STRUCTURE IN THE MOUTH SECTIONS OF THE CRIMEAN RIVERS BELBEK AND KACHA IN LOW WATER

Lomakin P. D.¹, Chepyzhenko A. I.¹, Popov M. A.²

¹Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russian Federation,

²A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: p_lomakin@mail.ru

Abstract: Based on the data from two expeditions conducted by the Marine Hydrophysical Institute in 2019 and 2020, the structural features of the temperature, salinity, total suspended matter and colored dissolved organic matter concentration fields in the estuary areas of the Crimean Belbek and Kacha rivers during low water are analyzed. It is shown that the structure of the thermohaline field was typical for the warm half-year and did not contain any signs of anthropogenic load. In the salinity field at the mouths of the rivers under study, slightly desalinated runoff lenses were found. In the fields of concentration of total suspended matter and concentration of colored dissolved organic matter, a significant anthropogenic component is revealed, determined by the influence of wastewater from the village of Lyubimovka and the flow of the studied rivers. In the estuary area of both rivers, approximately 200 m wide and 2–5 m deep, which can be considered a component of the natural marginal filter, a frontal distribution of the concentration of total suspended matter and the concentration of colored dissolved organic matter is observed. Approximately 50 % of the total suspended matter settled in this barrier zone, and about 20 % of the colored dissolved organic matter was retained from the content of these substances in the immediate vicinity of the mouths of the Belbek and Kacha rivers.

Keywords: temperature, salinity, total suspended matter, dissolved organic matter, marginal filter, Crimea

Сведения об авторах

Ломакин Павел Демьянович доктор географических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела океанографии, ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», ул. Капитанская, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: p_lomakin@mail.ru

Чепыженко Алексей Ильич кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», ул. Капитанская, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: ecodevice@yandex.ru

Попов Марк Александрович кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: mark.a.popov@mail.ru

Поступила в редакцию 24.06.2025

Принята к публикации 15.07.2025