

**Исследование распространения сточных вод  
у Гераклейского полуострова (Крым)  
в ситуации апвеллинга  
на основе экспедиционных данных  
и численного моделирования**

**П. Д. Ломакин \*, Ю. Н. Рябцев**

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\* e-mail: p\_lomakin@mail.ru*

**Аннотация**

На основе данных океанологической съемки, проведенной Морским гидрофизическим институтом в августе 2019 г., проанализированы особенности структуры полей температуры, солености, концентрации общего взвешенного и окрашенного растворенного органического веществ на участке вдоль юго-западного берега Гераклейского полуострова в ситуации ветрового апвеллинга. В структуре полей рассматриваемых величин выявлены признаки восходящей циркуляции и загрязнения, обусловленные сгонным ветром и наличием на рассматриваемом участке двух источников сточных вод. Численные эксперименты, выполненные с использованием трехмерной баротропной линейной модели Фельзенбаума, подтвердили наблюдавшийся апвеллинг и показали, что подъем вод антропогенного происхождения из канализационных источников к поверхности моря обусловлен как вдольбереговым, так и ориентированным по нормали к береговой линии сгонным ветром. Модельные расчеты также позволили проследить распространение антропогенной взвеси в ситуации апвеллинга. Показано, что в верхнем слое вод взвесь из канализационных источников распространялась в открытое море, а в промежуточном и придонном слоях она накапливалась вдоль береговой линии. При северном ветре эффект аккумуляции взвеси в прибрежной зоне более интенсивный.

**Ключевые слова:** структура вод, апвеллинг, загрязнение, численное моделирование, Гераклейский полуостров, Крым

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

© Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н. Исследование распространения сточных вод у Гераклейского полуострова (Крым) в ситуации апвеллинга на основе экспедиционных данных и численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 2. С. 49–60. EDN UUGLBF. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-49-60

## Study of Wastewater Distribution near the Heracleean Peninsula (Crimea) in the Upwelling Situation Based on Expedition Data and Numerical Modelling

P. D. Lomakin \*, Yu. N. Ryabtsev

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail: p\_lomakin@mail.ru

### Abstract

Based on the oceanographic survey data taken by Marine Hydrophysical Institute in August 2019, the paper analyzes the structural features of the fields of temperature, salinity, concentration of total suspended organic matter and coloured dissolved organic matter in the area along the southwestern coast of the Heracleean Peninsula in the situation of wind upwelling. The structure of the fields of the studied quantities shows signs of ascending circulation and pollution due to offshore wind and the presence of two wastewater sources in the studied area. The numerical experiments performed using the 3D barotropic linear Felsenbaum model confirmed the observed upwelling and showed that the rise of anthropogenic waters from sewer sources to the sea surface was due to both alongshore and offshore winds oriented normally to the coastline. They also made it possible to trace the distribution of anthropogenic suspension in the upwelling situation. It is shown that suspension from sewer sources in the upper layer of water spread to the open sea, and in the intermediate and near-bottom layers it accumulated along the coastline. With a northerly wind, the effect of suspended matter accumulation in the coastal zone is more intense.

**Keywords:** water structure, upwelling, pollution, numerical modelling, Heracleean Peninsula, Crimea

**Acknowledgements:** The work was performed under state assignment on topic no. FNNN-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”.

**For citation:** Lomakin, P.D. and Ryabtsev, Yu.N., 2023. Study of Wastewater Distribution near the Heracleean Peninsula (Crimea) in the Upwelling Situation Based on Expedition Data and Numerical Modelling. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 49–60. doi:10.29039/2413-5577-2023-2-49-60

### Введение

В течение последнего десятилетия акватория Севастопольского взморья у Гераклейского полуострова активно исследуется как на основе данных фактических наблюдений, так и на теоретическом уровне. Такой интерес вызван возрастающей антропогенной нагрузкой на водную среду этого участка побережья.

К настоящему времени сформировалась достаточно емкая литература [1–11], посвященная анализу структуры и динамики вод на базе океанографических данных, источникам загрязнения и гидрохимическому режиму региона, моделированию локальных систем течений и транспорту антропогенной взвеси, спутниковым исследованиям распространения загрязняющих веществ.

Среди обозначенных публикаций определенный интерес представляют статьи [8, 11], посвященные структуре вод рассматриваемой акватории в системе ветрового апвеллинга. В них показано, что в летние месяцы года при апвеллинге сточные воды из глубинных горизонтов проникают сквозь сезонный термоклин и выходят на поверхность моря. Это явление подтверждает выводы о закономерностях распространения загрязненных придонных вод в ситуации локального ветрового апвеллинга у берегов Крыма, изложенные в монографиях [12, 13]. Согласно мнению авторов цитируемых книг, в теплое полугодие в обычной ситуации резко стратифицированной среды сточные воды распространяются преимущественно в горизонтальном направлении под слоем сезонного термоклина. Тогда как при апвеллинге, который способствует ослаблению стратификации водной толщи, факелы сточных вод могут выходить на поверхность моря.

В августе 2019 г. сотрудниками Морского гидрофизического института была проведена экспедиция в районе, расположенном вдоль юго-западного берега Гераклейского полуострова. Согласно результатам экспедиционных исследований в наблюдавшейся ситуации ветрового апвеллинга и наличия развитого сезонного термоклина, в структуре полей океанологических величин были выявлены признаки, свидетельствующие о проникновении загрязненных придонных вод в поверхностный слой моря и их распространении в пляжную зону [11].

Цели настоящей статьи:

– на основе данных указанной экспедиции и методов численного моделирования рассмотреть особенности циркуляции вод и распространения антропогенной взвеси из известных источников загрязнения на участке моря у юго-западного берега Гераклейского полуострова;

– проанализировать факторы, формирующие прибрежную зону апвеллинга, закономерности распространения и структуру поля концентрации взвешенного вещества;

– сопоставить результаты экспедиционных исследований и численного моделирования.

Исследуемая акватория – участок Севастопольского взморья, расположенный вдоль юго-западного берега Гераклейского полуострова. Здесь находится известный источник загрязнения рассматриваемого региона – подводный трубопровод сточных хозяйственно-бытовых вод очистных сооружений «Южные», г. Севастополь [10] (рис. 1).

Оголовок выпуска трубопровода очистных сооружений расположен на удалении ~ 3 км от берега на глубине 88 м. На момент проведения анализируемой съемки в трубопроводе существовала протечка, ставшая дополнительным источником антропогенного взвешенного вещества. Первые сведения о протечке появились в 2014 г., а в 2017 г. стало известно, что она расположена на расстоянии ~ 700 м от берега на глубине 34–37 м [5].



Р и с . 1 . Географическое положение исследуемой акватории и схема станций океанологической съемки, выполненной 23 августа 2019 г.

Fig . 1 . Geographical position of the studied water area and map of stations of the oceanological survey performed on 23 August 2019

### Исходные данные и методы исследования

Для анализа структуры вод и выбора параметров модели численного эксперимента использованы данные экспедиции, проведенной Морским гидрофизическим институтом (г. Севастополь) 23 августа 2019 г. В рамках этой экспедиции был реализован комплекс синхронных наблюдений за температурой, соленостью, содержанием общего взвешенного вещества (ОВВ) и содержанием окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ). Съемка выполнена по схеме, включившей 20 дрейфовых станций на пяти разрезах, ориентированных примерно по нормали к береговой линии (рис. 1, а).

Координаты станций определяли при помощи навигатора *GPS*. Наблюдения вели с борта маломерного судна. Диапазон глубин на полигоне 6–150 м. Предельный горизонт зондирования 25–30 м.

На каждой станции все четыре параметра среды синхронно фиксировали в зондирующем режиме *in situ* с шагом по глубине 0.1 м при помощи измерительного комплекса «Кондор»<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 04.06.2023).

Отметим, что ОБВ и ОРОВ относят к группе лучших индикаторов загрязнения (в том числе и бактериального) прибрежных морских акваторий, а также других природных водоемов [14–16].

Сейчас не существует предельно допустимой нормы ОБВ и ОРОВ как численного показателя загрязнения водной среды. Поэтому для оценки значимости антропогенной составляющей в поле концентрации этих веществ их фактическое содержание сравнивалось с концентрацией, свойственной открытым водам Черного моря у берегов Крыма, которая, согласно [11], равна 2 мг/л для ОРОВ и 0.8 мг/л для ОБВ.

Эти значения условно приняты нами в качестве природной нормы концентрации данных величин в прибрежных черноморских водах у Крымского полуострова. Они использованы для выделения участков с антропогенной составляющей в полях концентрации ОБВ и ОРОВ и оценки степени загрязнения рассматриваемой акватории этими веществами.

Атмосферная синоптическая ситуация во время съемки определялась юго-восточной периферией антициклона с центром над Белоруссией <sup>2)</sup>.

Съемка сопровождалась свежим и сильным ветром, средняя суточная скорость которого равнялась 6 м/с, а направление изменялось в секторе от северного до северо-восточного. В море порывы ветра достигали 12–15 м/с. Волнение моря – 3–4 балла <sup>3)</sup>.

Для понимания происхождения выявленных особенностей в структуре вод и распространения загрязняющих веществ в акватории у Гераклеийского полуострова были привлечены методы численного моделирования.

В силу сравнительной мелководности рассматриваемой области течения здесь в основном определяются ветром. Будем считать, что перенос примеси осуществляется установившимися течениями. Для их расчета используем обобщенную на случай учета рэлеевского трения трехмерную баротропную линейную модель Фельзенбаума [17, 18].

В данной работе учитывался трехмерный характер распространения взвеси. Процесс распространения пассивной взвеси, обусловленный течениями и турбулентной диффузией, описывается уравнением в дивергентной форме, которое имеет вид [19, 20]

$$C_t + (uC - \mu C_x)_x + (vC - \mu C_y)_y + ((w + w_c) \cdot C - \kappa C_z)_z = 0,$$

где  $C(x, y, z, t)$  – концентрация взвеси;  $\kappa$  – вертикальный,  $\mu$  – горизонтальный коэффициенты турбулентной диффузии;  $w_c$  – собственная скорость взвеси.

В начальный момент времени концентрация взвеси равна нулю. Считаем, что в заданных точках происходит выброс взвеси. На боковых границах и на дне также ставятся условия отсутствия потоков взвеси.

Задача переноса примеси решается численно. Применяется консервативная схема, обладающая свойством транспортности и положительной определенности. Детально эта схема описана в работе [17].

---

<sup>2)</sup> URL: <http://smtp.pilzepilze.de/topkarten/fsreaeur.html> (дата обращения: 04.06.2023).

<sup>3)</sup> URL: [https://trp5.ru/Архив\\_погоды\\_на\\_Херсонесском\\_маяке](https://trp5.ru/Архив_погоды_на_Херсонесском_маяке) (дата обращения: 04.06.2023).

Использована равномерная сетка с шагами  $\Delta x = \Delta y = 40$  м. По вертикали применялась неравномерная сетка  $\Delta z_k = 1, 2, 4, 6, 14, 16, 27, H - 70$  м. Середины слоев находятся на глубинах: 0.5, 2, 5, 10, 20, 35, 56.5 м. Кинематический коэффициент вертикальной вязкости постоянный  $A = 30 \text{ см}^2/\text{с}$ ; параметр Кориолиса  $f = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ,  $\kappa = 0.1 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\mu = 100 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $w_c = -2 \text{ см}/\text{с}$ . Значение касательных напряжений на верхней границе полагалось равным  $1 \text{ см}^2/\text{с}^2$ , что соответствует скорости ветра 8 м/с.

Интегральная циркуляция вод определяется рельефом дна и направлением ветра. Численные эксперименты проведены для двух основных направлений ветра, которые сопровождали съемку, – северного и северо-восточного – при реальном рельефе дна и параметрах источников загрязнения.

### Обсуждение результатов

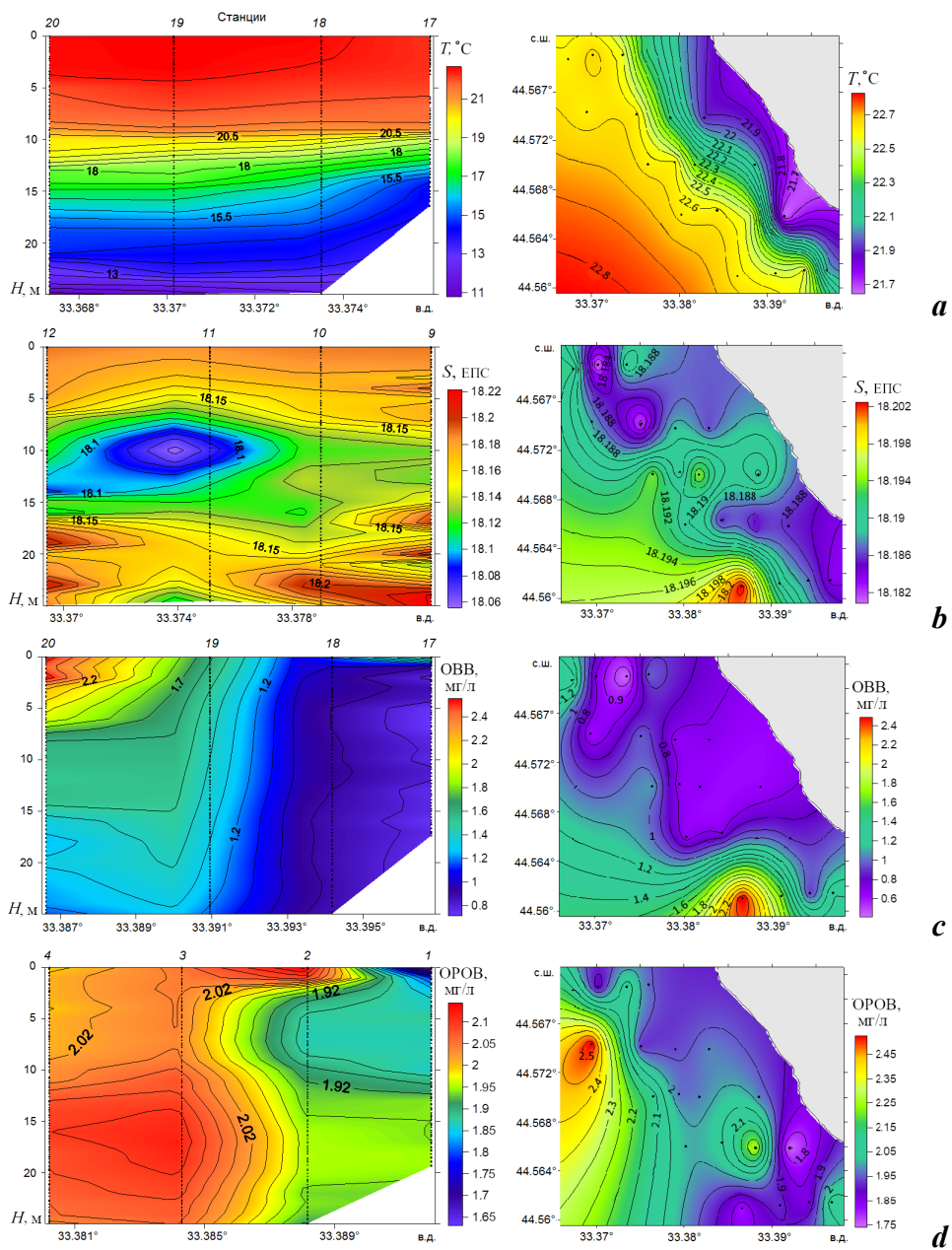
Анализ результатов экспедиционных исследований показал следующее. На рассматриваемом участке направление фактического ветра изменялось в секторе примерно от  $0^\circ$  до  $45^\circ$ . Судя по структуре полей температуры, солености и концентрации ОВВ и ОРОВ, данная ветровая ситуация сопровождалась подъемом вод из придонных горизонтов к поверхности моря в системе восходящей циркуляции ветрового апвеллинга. Причем эти воды имели явные признаки загрязнения. Об этом свидетельствуют следующие характерные свойства (рис. 2).

Очаг апвеллинга отчетливо выделялся в поле температуры в виде полосы прибрежных вод с пониженной на  $\sim 1^\circ\text{C}$  на окружающем фоне температурой. Поле температуры было хорошо стратифицированным с ярко выраженным (вертикальный градиент  $\sim -1^\circ\text{C}/\text{м}$ ) приподнятым у берега сезонным термоклином, который располагался между горизонтами 10 и 15 м и отчетливо виден на крайнем южном разрезе между станциями 17–20 (рис. 1; 2, а).

В вертикальной структуре поля солености обнаружены отдельные распресненные линзы вод с соленостью, пониженной на 0.05–0.17 ЕПС относительно фона. Вертикальный и горизонтальный размеры этих образований оценивались соответственно около 10 и 300 м. Наиболее значимые неоднородности в халинном поле отмечены в плоскости срединного разреза между станциями 9–12 (рис. 1; 2, б).

В крайней южной области полигона в поверхностном слое моря на фоне малоградиентного поля содержания ОВВ отчетливо выделялась линза с размером по вертикали 5–7 м и максимальной в пределах всей рассматриваемой акватории концентрацией 2.3–2.5 мг/л, что в три раза превышало природную норму (крайний южный разрез, станции 17–20). Кроме того, отмечены более мелкие образования с содержанием данного вещества антропогенного происхождения (рис. 1; 2, в).

В северо-западной части полигона наблюдалась линза с максимальной концентрацией ОРОВ (до 2.4 мг/л), которая прослеживалась во всей толще вод на крайнем северном разрезе между станциями 1–4. В вертикальной структуре поля концентрации ОРОВ, как и в структуре полей солености и содержания ОВВ, зафиксированы более мелкие неоднородности с повышенным примерно в 1.5 раза относительно природной нормы содержанием этого вещества (рис. 1; 2, д).



Р и с . 2. Вертикальное (слева) и горизонтальное в поверхностном слое (справа) распределение океанологических параметров среды: *a* – температуры, °С; *b* – солёности, ЕПС; *c* – концентрации ОВВ, мг/л; *d* – концентрации ОРОВ, мг/л, в районе выпуска сточных вод по данным экспедиции в августе 2019 г.

Fig . 2 . Vertical (left) and horizontal in the surface layer (right) distribution of oceanological environmental parameters: *a* – temperature, °C; *b* – salinity, PSU; *c* – total organic matter concentration, mg/L; *d* – coloured dissolved organic matter concentration, mg/L, near the wastewater outlet according to the data of the August 2019 expedition

Модельные эксперименты подтвердили наблюдавшийся в ходе океанологической съемки ветровой апвеллинг и выход к поверхности моря вод антропогенного происхождения. К тому же эти эксперименты показали ряд интересных эффектов, связанных с циркуляцией вод и временной динамикой распространения антропогенной взвеси, которые могут найти практическое применение.

Рассчитанные поля векторов течения по заданным горизонтам для северного и северо-восточного ветра выявили двухслойную кинематическую структуру и типичную для апвеллинга прибрежную ячейку поперечной циркуляции вод (рис. 3).

Течения в верхнем слое направлены по ветру в сторону моря, тогда как компенсационный поток у дна – к берегу. У берега на поверхности моря скорость течения была около 10 см/с. В придонном слое преобладали слабые течения со скоростью 1÷2 см/с.

При северном ветре, вектор которого направлен под тупым углом к береговой линии, а ориентированная на восток вдольбереговая составляющая хорошо выражена (рис. 3, *a, b*), апвеллинг определялся экмановским эффектом. В ситуации северо-восточного ветра, вектор которого направлен примерно по нормали к береговой линии, наблюдался типичный апвеллинг, вызванный ветровым сгоном (рис. 3, *c, d*).

При моделировании распространения взвеси общий объем выпуска трубопровода принят равным  $Q = 43\,800\text{ м}^3/\text{год}$  (по данным 1998 г. [10]). Будем считать, что через оголовок выпуска проходит  $0.8 Q$ , а через аварийный выпуск (протечку) –  $0.2 Q$ . Положение источников указано точками на рис. 4.

Расчеты проведены на вторые сутки. На рис. 4 показаны распределения концентрации взвеси в изолиниях с шагом 10 % от максимального значения

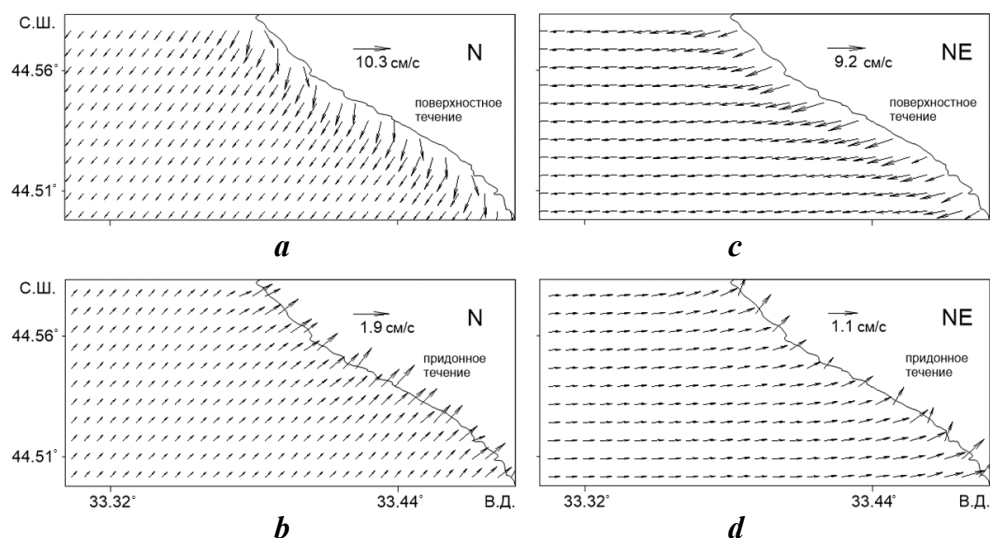


Рис. 3. Векторы течений на поверхности моря и у дна при северном (*a, b*) и северо-восточном (*c, d*) ветре

Fig. 3. Vectors of currents at the sea surface and near the bottom at north (*a, b*) and north-east (*c, d*) winds



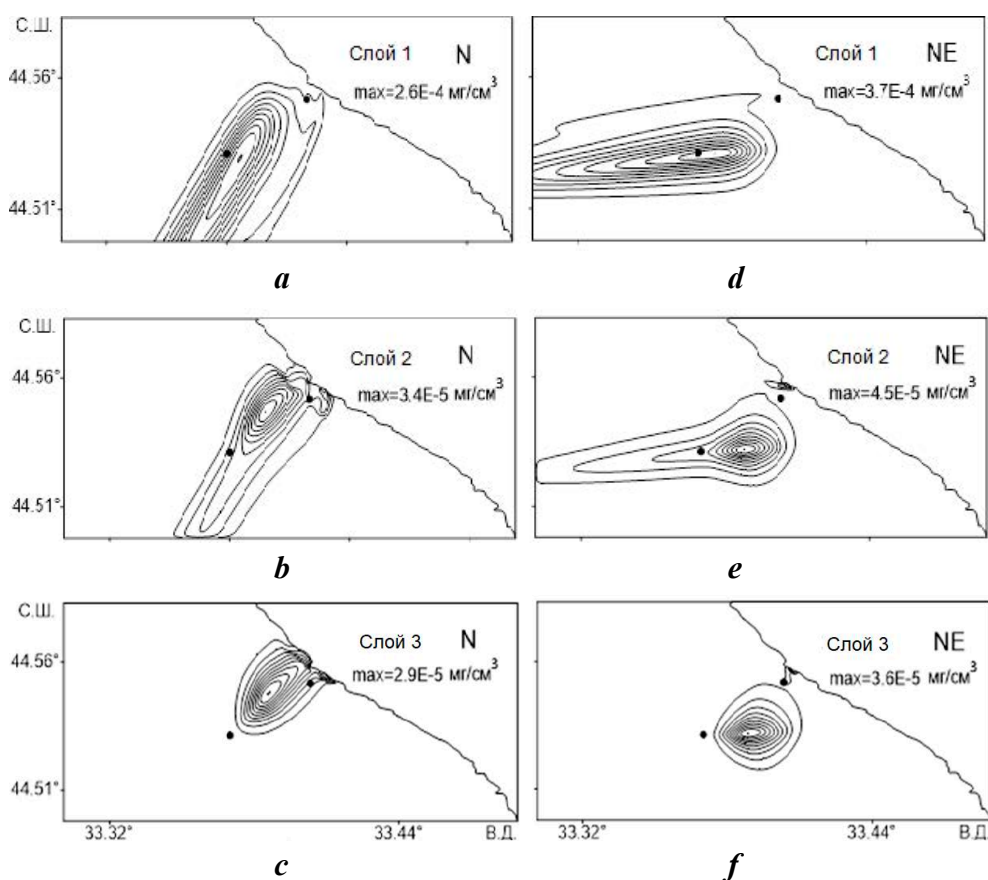


Рис. 4. Распределение концентрации взвеси через двое суток в трех слоях моря (верхнем, промежуточном и придонном) при северном (*a, b, c*) и северо-восточном (*d, e, f*) ветре

Fig. 4. Distribution of suspended matter concentration in two days in three sea layers (surface, intermediate and near-bottom) at north (*a, b, c*) and north-east (*d, e, f*) winds

в каждом слое. Такой способ представления выбран, чтобы обратить внимание не на количественные характеристики поступающих в водную толщу загрязнителей, а на особенности динамики и трансформации распределений концентрации взвеси.

Анализ полей расчетного содержания взвеси показал, что с момента «запуска» находящихся на дне источников при заданных направлениях и скорости ветра на рассматриваемом участке формируется двухслойная структура поля концентрации исследуемой величины с разнонаправленными потоками. В придонных горизонтах (слой 3) взвесь распространялась к берегу, тогда как в верхних слоях 1 и 2 ее выносило в мористую сторону.

К концу вторых суток в верхнем слое в районе основного выпуска возник максимум концентрации взвеси, а преобладающий ее поток был направлен в море и прослеживался на расстоянии около 2.5 миль от берега. В нижних слоях максимум распределения взвешенного вещества смещался в сторону

берега и распространялся на мелководье. Причем при северном ветре концентрация взвеси у берега достигала 40 % от максимума, тогда как при северо-восточном ветре – только 10 % (рис. 4).

У берегов Крыма в теплое полугодие во время ветровых сгонов и апвеллинга факелы сточных вод из придонного горизонта проникают сквозь термоклин к поверхности моря. Это свойство, впервые обнаруженное и исследованное авторами монографии [13], подтверждают полученные нами результаты численного моделирования (рис. 4) и данные натурных наблюдений (см. рис. 2).

### Заключение

На основе анализа структуры полей температуры, солености, концентрации общего взвешенного и окрашенного растворенного органического веществ, которые были получены по материалам экспедиции МГИ, проведенной в августе 2019 г., выявлено, что при северном и северо-восточном ветрах к поверхности моря из глубинных горизонтов распространились воды антропогенного происхождения. Подъем вод был связан с ветровым апвеллингом, а их источник представлен двумя выпусками в трубопроводе очистных сооружений «Южные».

Результаты модельных экспериментов подтвердили наблюдавшийся в ходе океанологической съемки апвеллинг и выход к поверхности моря вод антропогенной природы из реально существующих источников. Они также позволили проследить распространение антропогенной взвеси, поступающей из канализационных источников очистных сооружений «Южные».

Расчитанные поля векторов течений, генерируемых северным и северо-восточным ветрами, выявили ячейку поперечной циркуляции вод, типичную для прибрежного апвеллинга. Показано также, что на рассматриваемом участке взморья апвеллинг обусловлен как вдольбереговыми, так и сгонными ветрами, ориентированными по нормали к береговой линии.

Установлено, что у юго-западного берега Гераклейского полуострова вследствие особой структуры поля течений, вызываемых северным и северо-восточным ветрами, взвесь из канализационных источников в верхнем слое вод распространяется в открытое море, а в промежуточном и придонном слоях она накапливается вдоль береговой линии. При северном ветре эффект аккумуляции антропогенной взвеси в прибрежной зоне более интенсивный.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2 : Черное море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 421 с.
2. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : МГИ, 2011. 209 с. EDN XPERZR.
3. *Дулов В. А., Юровская М. В., Козлов И. Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 43–60. EDN VHEWWN.
4. *Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67. EDN TOYRSR.

5. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя / В. Г. Бондур [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. № 4. С. 42–54. EDN BLJAKG. doi:10.7868/S2073667318040068
6. Определение местоположения начального поля концентрации возможного источника загрязнения в акватории черного моря у Гераклейского полуострова на основе метода сопряженных уравнений / С. Г. Демьшев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 2. С. 226–237. EDN QXFBMA. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-226-237
7. *Иванов В. А., Фомин В. В.* Численное моделирование заглубленного стока в прибрежной зоне Гераклейского полуострова // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 89–103. EDN XGXUMZ.
8. Сезонная динамика содержания и локальные источники биогенных элементов в водах прибрежной акватории Гераклейского полуострова / Е. Е. Совга [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 1. С. 56–65. EDN XSWBAT. doi:10.22449/0233-7584-2017-1-56-65
9. *Иванов В. А., Рябцев Ю. Н.* Моделирование транспорта взвеси канализационного выпуска в районе м. Фиолент // *Процессы в геосредах*. 2017. № 1. С. 419–426. EDN YRXXRF.
10. Источники загрязнения прибрежных вод севастопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN VEOVBB. doi:10.31857/S0030-1574594579-590
11. *Ломакин П. Д., Чепыженко А. И.* Структура полей океанологических величин в зоне апвеллинга у Гераклейского полуострова (Крым) в августе 2019 года // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2022. № 1. С. 31–41. EDN JCOWQH. doi:10.22449/2413-5577-2022-1-31-41
12. Опыт теоретического и экспериментального исследования проблемы глубоководного сброса сточных вод на примере района Ялты / В. И. Зац [и др.]. Киев : Наукова думка, 1973. 274 с. EDN NJPKLR. URL: <https://rest.marine-research.ru/api/core/bitstreams/62efdb9f-325f-4671-a822-2727bdea9c2a/content> (дата обращения: 11.06.2023).
13. Моделирование процессов самоочищения вод шельфовой зоны моря / Под ред. В. И. Заца, Г. А. Гольдберга. Ленинград : Гидрометеиздат, 1991. 230 с. EDN HFIEWK. URL: <https://rest.marine-research.ru/api/core/bitstreams/4769e377-8e2f-431f-b9c1-0d8988ebb630/content> (дата обращения: 11.06.2023).
14. 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>
15. 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. doi:10.1071/EN12081
16. Direct effects of organic pollutants on the growth and gene expression of the Baltic Sea model bacterium *Rheinheimera* sp. BAL341 / С. М. G. Karlsson [et al.] // *Microbial Biotechnology*. 2019. Vol. 12, iss. 5. P. 892–906. doi:10.1111/1751-7915.13441
17. *Шануро Н. Б.* Моделирование течений на севастопольском взморье // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. Вып. 14. С. 119–134. EDN ZBOAEP.

18. *Шапиро Н. Б., Юценко С. А.* Моделирование ветровых течений в сева­стопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 1. С. 42–57.
19. *Астраханцев Г. П., Руховец Л. А., Егорова Н. Б.* Математическое моделирование рас­пространения взвесей в водоемах // Метеорология и гидрология. 1988. № 6. С. 71–79.
20. *Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б., Юценко С. А.* Моделирование распространения пассивной взвеси в сева­стопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 3. С. 29–42.

Поступила 6.12.2022 г.; одобрена после рецензирования 21.03.2023 г.; принята к публикации 03.05.2023 г.; опубликована 26.06.2023 г.

*Сведения об авторах:*

**Ломакин Павел Демьянович**, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: V-7761-2017**, *p\_lomakin@mail.ru*

**Рябцев Юрий Николаевич**, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0002-9682-9969**, **SPIN-код: 7853-4597**, *ruab@mail.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Ломакин Павел Демьянович** – общее научное руководство исследованием, формулировка цели и задач; интерпретация результатов экспедиционных исследований, написание текста статьи

**Рябцев Юрий Николаевич** – выбор параметров модели, ее адаптация, выполнение численных экспериментов и их интерпретация, редактирование статьи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*