

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В БУХТЕ ОМЕГА (КРЫМ)
НА ОСНОВЕ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ДАННЫХ И ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

П.Д. Ломакин^{1,2}, Ю.Н. Рябцев¹, А.И. Чепыженко¹

¹ Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», РФ, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: p_lomakin@mail.ru

² Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

Раскрыты закономерности распространения общего взвешенного вещества в системе ветровых течений из области поднятия дна в акватории бухты Омега. По данным наблюдений показано, что в районе поднятия дна существует топографическая квазистационарная вихревая ячейка, аккумулирующая загрязняющие вещества. На основе численного моделирования выявлено, что меридиональные ветры всех направлений способствуют переносу взвеси из области поднятия дна к западному берегу бухты в зону пляжа, на небольшой прибрежный участок с характерным изгибом береговой линии. Наиболее значимые потоки взвеси генерирует северо-восточный и юго-восточный ветры. При западном ветре основной поток взвеси направлен к восточному берегу бухты. Типичные для Севастополя слабые восточные ветры не вызывают вынос взвешенного вещества из центральной области исследуемой бухты.

Ключевые слова: растворенные нефтепродукты, взвешенное вещество, ветер, течения, моделирование, загрязнение, бухта Омега, Крым.

Поступила в редакцию: 15.06.2021. После доработки: 12.08.2021.

Введение. Бухта Омега (другое название Круглая) расположена на юго-западном побережье Крымского полуострова, в южной части севастопольского взморья, между бухтами Абрамова и Стрелецкая. Бухта меридионально ориентирована и свободно сообщается с морем. Протяженность ее осевой линии около 1 мили, ширина устьевой области бухты ~ 0,3 мили, глубина моря на входе 13–17 м. Ее кутовая часть, с горизонтальным масштабом 150–200 м и глубиной 0,5–1,2 м, отделена от центральной области двумя мысами (рис. 1).

Омега – одна из немногих бухт севастопольского взморья, где расположены городские пляжи. Она интересна в рекреационном плане, особенно в современных условиях возрастающей антропогенной нагрузки.

В начале текущего столетия в бухте велись гидрографические исследования. В частности, были выполнены прецизионные промеры дна, составлена детальная карта глубин, получены сведения о динамике взвешенного вещества.

Первые комплексные экспедиционные океанологические исследования

бухты были проведены в 2019–2020 гг. [1, 2]. На их основе сложились представления о течениях, структуре полей океанологических величин и источниках антропогенной нагрузки на акватории бухты. В работе [3] описаны основные источники загрязнения Омеги, оценен объем сточных вод, проанализирован гидрохимический состав загрязняющих веществ.

В настоящей статье рассмотрен один из значимых, на наш взгляд, и неизвестный ранее источник общего взвешенного вещества (ОВВ) и растворенных нефтепродуктов (РН), а также закономерности распространения взвеси от этого источника на акватории бухты.

Цель работы – на основе анализа данных наблюдений показать: что в районе поднятия дна, расположенного в центральной части бухты Омега, происходит аккумуляция взвешенных и загрязняющих веществ; при помощи методов численного моделирования раскрыть закономерности распространения этих веществ в системе ветровых течений из области их накопления по акватории исследуемой бухты.

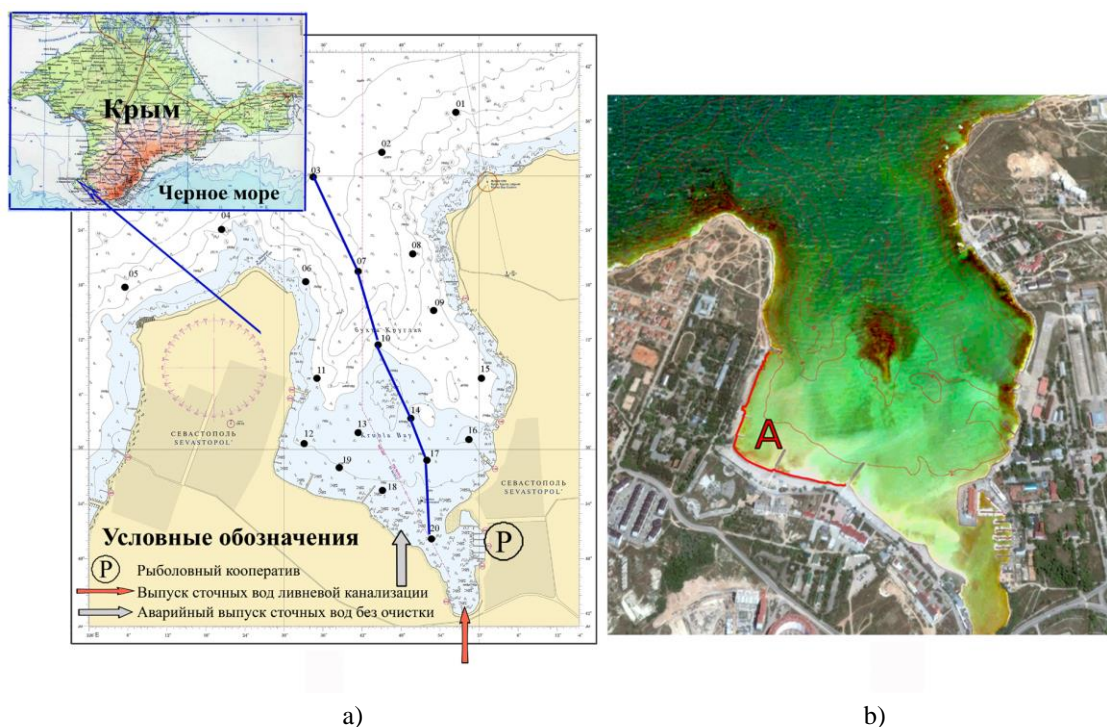


Рис.1. Географическое положение бухты Омега со схемой станций океанологических съемок (а); спутниковый снимок бухты с отмеченным красной линией участком аккумуляции взвеси – А (b)
Fig. 1. Geographical position of Omega Bay with the scheme of oceanographic survey stations (a); satellite image of the bay with a section of suspension accumulation marked with a red line – A (b)

Исходные данные и методы исследования. Для описания поднятия дна, как источника загрязняющих веществ, использованы сведения о локальной системе течений, термохалинной структуре вод, структуре полей концентрации ОБВ и РН, полученные в ходе гидрографических и океанологических исследований бухты Омега, которые изложены в статьях [1, 2].

Распространение взвеси из этого источника рассмотрено на основе численных экспериментов, выполненных при помощи баротропной линейной модели Фельзенбаума [4, 5].

Обсуждение результатов. По мнению авторов статьи [3], бухта Омега загрязняется сточными ливневыми и канализационными водами, коллекторы которых выведены в ее куттовую часть. Согласно сообщению сотрудников Морского гидрофизического института [6], в бухту также поступают сточные воды рыболовецкого кооператива «Дельфин» и находящегося рядом, построенного на искусственно расширенном участке берега в течение ~ 10 последних лет, комплекса зданий (рис. 1, а).

Одна из морфометрических особенностей исследуемой бухты, определяющая динамику вод, ОБВ и структуру полей океанологических величин, – расположенное в центральной области обширное каменистое поросшее травой и частично занесенное песком поднятие дна (рис. 1, б). При штормовом волнении и крупной зыби его вершина выходит на поверхность моря [1].

В ходе гидрографических исследований было установлено, что песок, которым в начале курортного сезона эпизодически засыпаются пляжи на западном берегу бухты, попадает в воду и осаждается в центральной части, в районе поднятия дна.

Аккумулирующий эффект в районе поднятия, согласно [1, 2], связан с квазистационарной топографической вихревой ячейкой, которая формируется вследствие взаимодействия течений с данным морфометрическим образованием. Это продемонстрировано на рис. 2, где показано распределение содержания РН в бухте Омега, по результатам океанологической съемки, проведенной в ноябре 2019 г.

Концентрация РН представлена в относительных единицах (отн. ед.) и показывает, во сколько раз наблюдаемое фактическое содержание этой величины

превосходит его концентрацию, типичную для открытых вод центральной части Черного моря, которая принята за единицу.

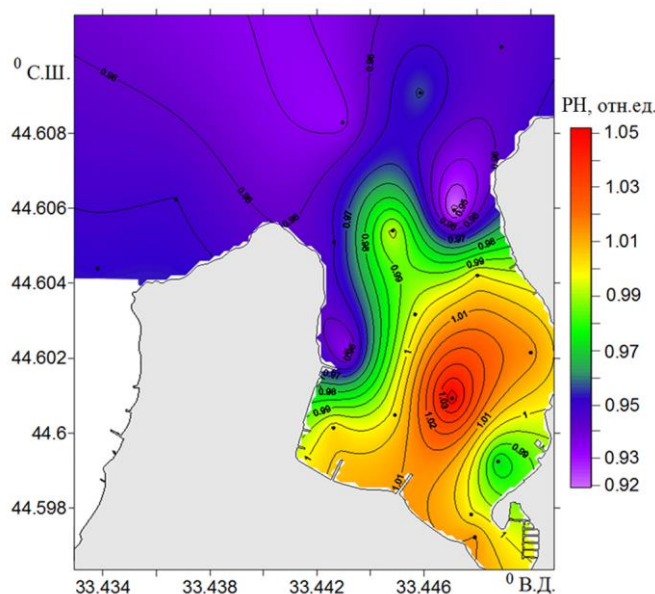


Рис. 2. Распределение содержания растворенных нефтепродуктов, отн. ед. на поверхности в бухте Омега в ноябре 2019 г.

Fig. 2. Distribution of the content of dissolved petroleum products, rel. units on the Omega Bay surface in November 2019

На рис. 2 видна отчетливо выраженная линза повышенного содержания РН с ядром в районе поднятия дна. Ее происхождение можно объяснить следующим образом.

Согласно мнению авторов известной монографии [7], основной источник нефтепродуктов в прибрежной зоне океанов, морей и других водоемов связан с эксплуатацией маломерных судов, снабженных двухтактным двигателем. С выхлопом такого двигателя в воду поступают концентрированные нефтепродукты, которые со временем оседают на дно и переходят в растворенную фазу.

В юго-восточной части бухты находится рыболовно-любительский кооператив "Дельфин" (рис. 1, а), десятки маломерных судов которого практически ежедневно в течение года, следуя в море и обратно малым ходом, пересекают акваторию вокруг поднятия дна.

Над отмелью в воду с выхлопом судовых двигателей постоянно поступают

нефтепродукты. Благодаря вихревой квазистационарной структуре течений, здесь они концентрируются, оседают на дно и переходят в растворенное состояние.

По-видимому, грунт отмели – источник РН в бухте Омега. Сорбируясь на взвеси, нефтепродукты течениями разносятся по акватории бухты.

Также известна основная прибрежная область аккумуляции – это участок пляжа протяженностью в несколько сотен метров с характерным изгибом береговой линии, где при северном и, особенно, северо-восточном ветре скапливается значительное количество травы, растущей в центре бухты на поднятии дна, и всевозможного мусора.

Как показали численные модельные эксперименты, в большинстве рассмотренных ветровых ситуаций именно этот участок с характерным изгибом береговой линии принимает потоки взвешенно-

го вещества от источника в центре бухты.

На рис. 1, в соответствующий изгиб берега отмечен красной ломанной линией, а сам участок прибрежной акватории обозначен заглавной буквой А, и далее по тексту, для удобства описания, именуется, как участок А.

Связанная с ветровыми течениями и поднятием дна динамика взвеси в акватории бухты, проанализирована на модельном уровне. Вследствие мелководности рассматриваемой области, течения в основном определяются рельефом дна, а также направлением и силой ветра.

Будем считать, что перенос примеси осуществляется установившимися течениями, и для их расчета используется обобщенная на случай учета рэлеевского

трения трехмерная баротропная линейная модель Фельзенбаума [4, 5].

На поверхности моря, представляющей собой поверхность тока, касательное напряжение ветра уравнивается турбулентным трением в морской среде. На дне принимается условие прилипания. На твердых боковых границах бассейна ставится смягченное условие непротекания, т.е. равенство нулю нормальной составляющей полного потока. На открытых жидких границах – условие свободного протекания. Подробности алгоритма изложены в работе [5].

Учитывается трехмерный характер распространения взвеси. Процесс распространения пассивной взвеси, обусловленный течениями и турбулентной диффузией, описывается уравнением в дивергентной форме, имеющим вид (1),

$$C_t + (uC - \mu C_x)_x + (vC - \mu C_y)_y + ((w + w_c) C - \kappa C_z)_z = 0, \quad (1)$$

где C – концентрация взвеси; κ – вертикальный; μ – горизонтальный коэффициенты турбулентной диффузии; w_c – собственная скорость взвеси.

Полагаем, что в заданной точке происходит выброс взвеси

$$\text{при } x_1, y_1, z = H(x_1, y_1) \quad C = C_0$$

На боковых границах и на дне принимаются условия отсутствия потоков взвеси. В начальный момент времени концентрация взвеси равна нулю.

Задача решается численно. Применяется положительно определенная, транспортная, консервативная схема. Схемная диффузия исключается применением метода коррекции потоков [5].

Использовалась равномерная сетка с шагами $\Delta x = 8$ м и $\Delta y = 11$ м. По вертикали применялась неравномерная сетка $\Delta z_k = 1, 2, 4, 6, 14, 16, 27, H - 70$ м. Кинематический коэффициент вертикальной вязкости принимался постоянным $A = 30$ см²/с; параметр Кориолиса $f = 10^{-4}$ с⁻¹, $\kappa = 0,1$ см²/с, $\mu = 100$ см²/с, $w_c = 0$. Амплитуда напряжения ветра полагалась равной 1 см²/с², что соответствует скорости ветра 8 м/с.

Расчеты проведены на 2 суток. Нас интересовали не абсолютные величины в особенностях распределений, а динамика трансформации этих распределений. Течения на поверхности (11–16 см/с) и в придонном слое (~3 см/с) ориентированы в противоположном направлении. Расчеты выполнены послойно для восьми основных румбов направления ветра.

Рассматривался один, выявленный по результатам экспедиций и описанный выше источник, – поднятие дна. Поскольку РН и пресные воды имеют тенденцию к всплытию, то приведены и анализируются картинки для верхнего слоя вод толщиной 0,1 м.

Рассмотрим каждый из ситуационных вариантов для 8 румбов ветра, которые изображены на рис. 3 для меридиональных ветров и на рис. 4, – для зональных. Здесь пространственные распределения взвеси показаны с шагом 10% от максимального значения в анализируемом источнике. Такой способ представления позволяет показать ареал распространения независимо от мощности источника (величину, которую мы можем только предполагать). Можно говорить о том, что взвесь со временем, вероятнее всего, будет накапливаться в

местах максимальной концентрации, показанных в модельных экспериментах.

Обладающие максимальным разгоном ветры северной четверти генерируют наиболее интенсивные потоки взвешенного вещества, которое из района поднятия дна распространяется преимущественно на запад, в пляжную зону исследуемой бухты, при этом ядро взвеси в районе поднятия максимально размывто.

Северо-западный ветер вызывает поток взвешенного вещества из центра бухты на юго-восток. Воды с содержанием взвеси до 30% от максимальной

концентрации достигают района стоянки судов кооператива «Дельфин». Менее интенсивный широкий поток взвеси с концентрацией ~10% от максимальной из центра бухты направлен на запад и проникает в северную часть пляжной зоны (рис. 3, а).

При северном ветре взвесь из центра бухты распространяется в юго-западном направлении и достигает центральной части пляжной зоны, где на крайнем западном участке изгиба береговой линии, ее концентрация ~20% от максимума (рис. 3 б).

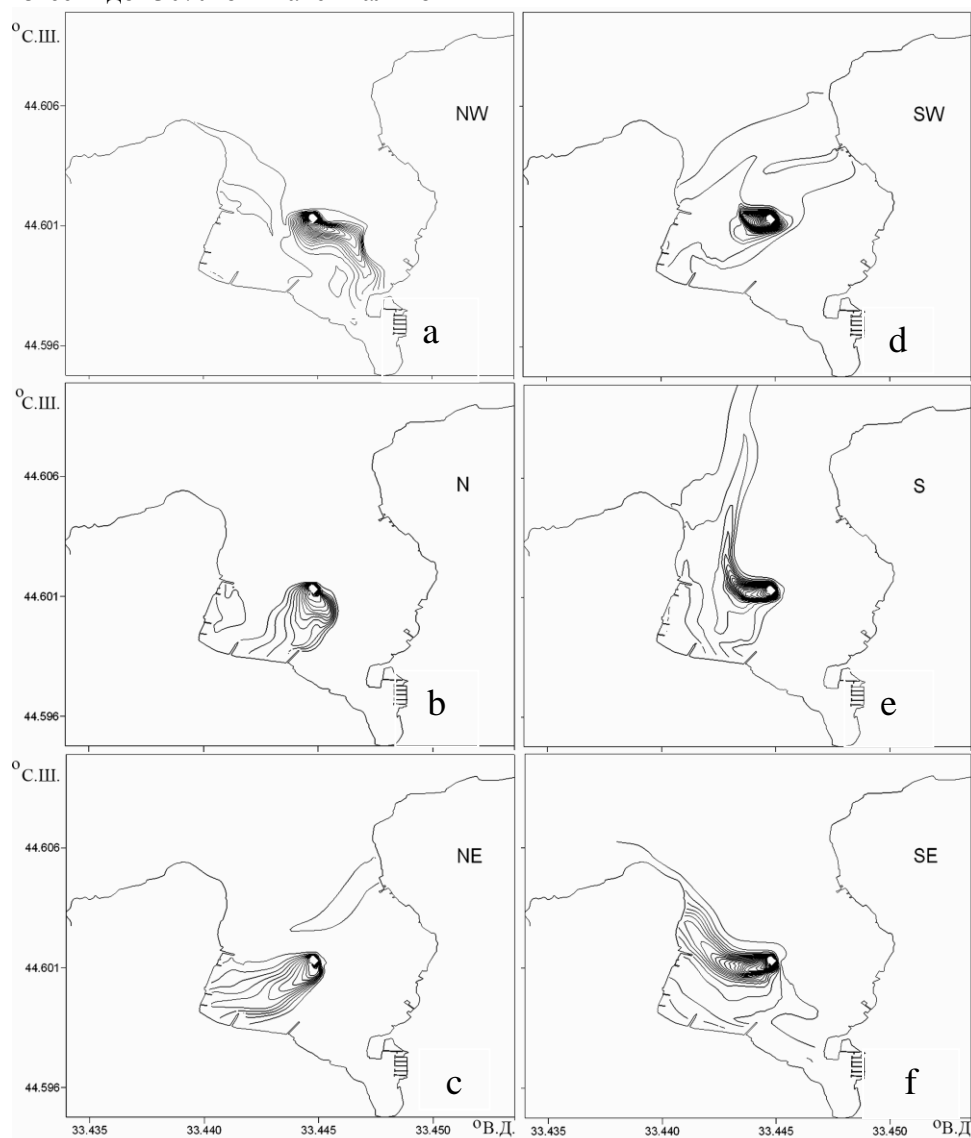


Рис. 3. Распределение взвеси в верхнем слое для меридиональных ветров: северной NW, N, NE (a, b, c) и южной SW, S, SE (d, e, f) четверти
Fig. 3. Distribution of suspended matter in the upper layer for meridional winds: northern NW, N, NE (a, b, c) and southern SW, S, SE (d, e, f) quarters

Северо-восточный ветер способствует формированию наиболее развитого потока взвешенного вещества юго-западного направления. В этой ситуации весь поток сконцентрирован на участке А, где содержание взвеси максимально, до 50–70% от максимума, а ядро взвеси в источнике наиболее размыто (рис. 3, с).

Менее интенсивные, за счет ограниченного разгона, ветры южной четверти не способствуют выносу взвешенного вещества из центральной части бухты Омега. При этих ветрах концентрация взвеси в районе поднятия дна максимальна.

Юго-западный ветер вызывает перенос взвеси из центра бухты, как в северо-восточном, так и в юго-западном направлениях. В пляжной зоне на участке А ее концентрация равна 20% от максимума. Слабый поток взвеси из района поднятия дна, который направлен на северо-восток, характеризуется концентрацией 10% (рис. 3, d).

Южный ветер вызывает отток взвеси из центральной области бухты в открытые воды, также ее накопление (концен-

трация до 20–30% от максимума) в пляжной зоне на участке А (рис. 3, e).

Юго-восточный ветер генерирует интенсивный поток взвешенного вещества, направленный на северо-запад. При этом, периферия этого потока с концентрацией 10–30% от максимума распространяется на участок А, а основная часть с содержанием 50–70% от максимума достигает прибрежной акватории у северо-западного мыса бухты (рис. 3, f).

Меридиональные ветры всех направлений способствуют переносу взвеси из области поднятия дна в зону пляжа, расположенную на западном берегу бухты Омега. Взвешенное вещество, в основном, принимает небольшой прибрежный участок А, куда поступают потоки с концентрацией взвеси 10–70% от максимума в источнике. Наиболее значимы потоки с содержанием взвеси до 50–70% от максимума, которые генерируют северо-восточный и юго-восточный ветры.

Западный и восточный ветры вызывают зональный перенос взвешенного вещества в бухте Омега (рис. 4).

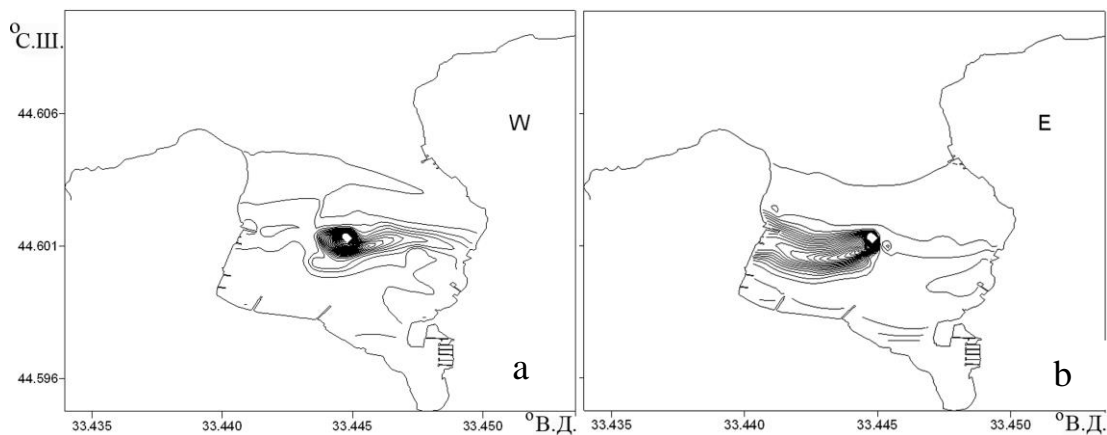


Рис. 4. Распределение взвеси в верхнем слое для зональных ветров: западного W (a) и восточного E (b)

Fig. 4. Distribution of suspended matter in the upper layer for zonal winds: western W (a) and eastern E (b)

При западном ветре основной поток взвешенного вещества направлен на восток и у восточного берега в центральной части Омеги содержание взвеси в нем до 20–40% от максимума. В этой ситуации также наблюдается менее интенсивный поток западного направ-

ления с концентрацией взвеси 10–20% (рис. 4, a).

Восточный ветер, согласно анализируемому модельному эксперименту, вызывает насыщенный поток взвешенного вещества из области поднятия дна в пляжную зону западного берега бухты (рис. 4, b).

Отметим интересную, характерную для Севастополя, локальную атмосферную синоптическую ситуацию. При восточных ветрах над Крымом, в районе Севастополя, вследствие орографического эффекта, устанавливается штилевая и маловетренная погода, когда скорость восточного ветра, как правило, не более 3 м/с. Это явление, хорошо известное местным метеорологам, получило наименование *восточного положения*.

В городе и в районе исследуемой бухты никогда не бывает умеренного и сильного восточного ветра. Реальный слабый ветровой поток, наблюдаемый при восточном положении, вряд ли способен к генерации более или менее устойчивой системы течений и, соответственно, формированию потока взвешенного вещества, выявленного в результате численного моделирования. Поэтому вариант расчета, показанный на рис. 4, б, – чисто теоретическая не существующая в природе картинка.

Заключение. На основе анализа данных наблюдений показано, что расположенное в центральной части бухты Омега поднятие дна, представляет собой источник взвеси и растворенных нефтепродуктов. При помощи методов численного моделирования выявлены закономерности распространения взвешенного вещества ветровыми течениями из области поднятия дна по акватории исследуемой бухты.

В центре бухты Омега, в области поднятия дна, наблюдается аккумулярующий эффект, связанный с квазистационарной топографической вихревой ячейкой, которая формируется вследствие взаимодействия течений с данным морфометрическим образованием. Накапливающиеся здесь растворенные нефтепродукты и другие загрязняющие вещества, а также песок и мусор течениями разносятся по акватории бухты.

Показано, что меридиональные ветры всех направлений способствуют переносу взвеси из области поднятия дна к западному берегу бухты, в зону пляжа, на небольшой прибрежный участок с характерным изгибом береговой линии. Наиболее значимы потоки с со-

держанием взвеси до 50–70% от максимума вызывают северо-восточный и юго-восточный ветры.

При западном ветре основной поток взвеси направлен к восточному берегу бухты Омега. Типичные для Севастополя слабые восточные ветры не вызывают вынос взвешенного вещества из центральной области исследуемой бухты.

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам: (1) № 0827-2020-0004 «Комплексные «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей»; (2) «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия» (№ госрегистрации АААА-А19-119031490078-9). Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополя в рамках научного проекта № 18-45920068.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломакин П.Д., Чепыженко А.И. Течения и поля содержания общего взвешенного и растворенного органического веществ в водах Севастопольского взморья в августе 2019 года // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 4 (38). С. 60–65. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-4-60-65
2. Ломакин П.Д., Чепыженко А.И. Исследование и контроль циркуляции вод и структуры термохалинного поля в бухте Омега (Крым) в летне-осенний период 2019 года // Система контроля окружающей среды. 2020. Вып. 3 (41). С. 15–22. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-3-15-22
3. Источники загрязнения прибрежных вод севастопольского района / В.М. Грузинов, Н.Н. Дьяков, И.В. Мезенцева и др. // Океанология. 2019.

Т. 59, № 4. С. 579–590. DOI: 10.31857/S0030-1574594579-590

4. Шاپиро Н.Б. Моделирование течений на сева­стопольском взморье // Экологическая безопасность прибреж­ной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2006. Вып. 14. С. 119–134.

5. Шاپиро Н.Б., Ющенко С.А. Мо­делирование ветровых течений в сева­стопольских бухтах // Морской гидро­физический журнал. 1999. № 1. С. 42–57.

6. <https://sevastopol.su/news/v-sevastopole-hotyat-vzorvat-buhtu-omega> (дата обращения: 20.06.2021).

7. Coleman J., Baker J., Cooper C. et al. Oil in the sea III: Inputs, Fates, and Effects. Committee on Oil in the Sea: In­puts, Fates, and Effects // Ocean Studies Board and Marine Board. Divisions of Earth and Life Studies and Transportation Research Board. National research council of the National Academies. 2003, ISBN 0-309-08438-5. doi. 2002015715 <http://en.bookfi.net/book/824825>

RESEARCH OF SOURCES AND DISTRIBUTION OF SUSPENDED MATTER IN OMEGA BAY (CRIMEA) BASED ON EXPEDITIONAL DATA AND NUMERICAL SIMULATION

P.D. Lomakin^{1,2}, Yu.N. Ryabtsev¹, A.I. Chepyzhenko¹

¹Marine Hydrophysical Institute of RAS, RF, Sevastopol, Kapitanskaya St., 2

²Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The regularities of the suspended matter distribution in the system of wind currents from the area of bottom elevation along the Omega Bay are revealed. Observational data show that in the region of bottom elevation there is a topographic quasi-stationary eddy cell accumulating pollutants. Based on numerical modeling, it is revealed that the meridional winds of all directions contribute to the transfer of the suspended matter from the area of elevation to the western coast of the bay to the beach area, to a small coastal area with a characteristic bend of the coastline. The most significant suspended matter flows are generated by northeasterly and southeasterly winds. With a westerly wind, the main flow of suspended matter is directed to the eastern coast of the bay. The weak easterly winds, typical for Sevastopol, do not cause the removal of suspended matter from the central area of the investigated bay.

Keywords: dissolved oil products, suspended matter, wind, currents, modeling, pollution, Omega Bay, Crimea.

REFERENCES

1. Lomakin P.D. and Chepyzhenko A.I. Tечения и поля содержания об­щего взвешенного и растворенного органического вещества в водах Севастопольского взморья в августе 2019 года (Currents and fields of the total suspended matter and dissolved organic matter content in the waters of the Sevastopol seaside in August 2019). *Monitoring systems of environment*, 2019, Vol. 4, No. 38, pp. 60–65. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-4-60-65

2. Lomakin P.D. and Chepyzhenko A.I. Исследование и контроль циркуляции вод и структуры термо­галинного поля в бухте Омега (Крым) в летне-осенний период 2019 года (Research and control of water circulation and structures of the thermohaline field in Omega Bay (Crimea) in the summer-autumn period 2019). *Monitoring systems of environment*, 2020, Vol. 3, No. 41, pp. 15–22. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-3-15-22

3. Грузинов В.М., Д'яков Н.Н., Меценцева И.В., Мал'ченко Ю.А., Жохова Н.В. and Коршен­ко А.Н. Источники загрязнений прибрежных вод сева­стопольского района (Sources of pollution of coastal waters of the Sevastopol region). *Океанология*, 2019, Vol. 59, No. 4, pp. 579–590. DOI: 10.31857/S0030-1574594579-590

4. Шاپиро Н.Б. Моделирование течений на сева­стопольском взморье (Modeling currents on the Sevastopol seaside). *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*, 2006, Vol.14, pp. 119–134.

5. Шاپиро Н.Б. and Ющенко С.А. Моделирование ветровых течений в сева­стопольских бухтах (Modeling wind currents in Sevastopol bays). *Морской гидрофизический журнал*. 1999, No.1, pp. 42–57.

6. <https://sevastopol.su/news/v-sevastopole-hotyat-vzorvat-buhtu-omega> (date of circulation: 20.06.2021).

7. *Coleman J., Baker J., Cooper C. et al.* Oil in the sea III: Inputs, Fates, and Effects. Committee on Oil in the Sea: Inputs, Fates, and Effects. Ocean Studies Board and Marine Board. Divisions of Earth and Life Studies and Transportation Research Board. *National research council of the National Academies*. 2003, ISBN 0-309-08438-5. doi. 2002015715 <http://en.bookfi.net/book/824825>