ПОЛЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ДИНАМИКА ОБЩЕГО ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА У ЮГО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

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

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

На основе данных экспедиции, организованной Российским географическим обществом (г. Севастополь) и проведенной сотрудниками Морского гидрофизического института и Института природно-технических систем в ноябре 2018 г., обнаружены источники и проанализированы закономерности структуры поля концентрации общего взвешенного вещества на прибрежных участках у юго-западного побережья Крымского полуострова. Для каждого из выявленных источников выполнено численное моделирование процесса распространения и аккумуляции взвеси в системе локальных течений в зависимости от ветровой деятельности. Оценены масштабы зон влияния источников антропогенной взвеси. Определены вероятные места ее накопления.

Ключевые слова: общее взвешенное вещество, распространение и аккумуляция взвеси, Крымский полуостров, Черное море.

Поступила в редакцию: 27.01.2020. После доработки: 04.03.2020.

Введение. Исследуемый участок расположен у юго-западного побережья Крымского полуострова и включает в себя акваторию Стрелецкой бухты с прилегающими водами севастопольского взморья [1] (рис. 1). В океанологическом плане рассматриваемый участок крымского побережья практически не исследован. В настоящей статье проанализированы закономерности структуры поля содержания общего взвешенного вещества (ОВВ) и его основные источники в водах изучаемой акватории, которые были выявлены нами по материалам экспедиционных исследований. На основе метода численного моделирования определены пути распространения и места аккумуляции взвеси в системе локальных течений в зависимости от поля ветра.

Исходные данные и методы исследования. Анализ выполнен на базе данных экспедиции, организованной Российским географическим обществом (г. Севастополь). В рамках этой экспедиции был реализован комплекс наблюдений за гидрофизическими элементами

среды. Съёмка проведена 11 ноября 2018 г. по схеме станций (всего 21), представленной на рис. 1. Координаты станций определялись при помощи навигатора GPS. Заборные работы выполнены в дрейфе с борта маломерного судна. Диапазон глубин на полигоне 0,8–22,3 м.

Численные эксперименты выполнены при помощи баротропной линейной модели Фельзенбаума [2, 3].

Обсуждение результатов. Погода во время съёмки была обусловлена антициклональными синоптическими атмосферными процессами. Наблюдался полный штиль. На преобладающей части акватории Стрелецкой бухты отсутствовало волнение. В открытую ее область с моря от северо-запада проникали волны зыби, высотой около 1 м.

Время выполнения съёмки пришлось на период осенне-зимнего выхолаживания, которое сопровождалось конвективным перемешиванием и качественным изменением вертикальной структуры вод.

Рис. 1. Географическое положение исследуемого участка побережья. Схема станций комплексной океанологической съемки, выполненной 11 ноября 2018 г.

Fig. 1. The geographical position of the coast investigated section. Scheme of complex oceanographic survey stations performed on November 11, 2018

К основным факторам, генерирующим систему течений в бухте и определяющим структуру гидрофизических полей, распространение взвеси и растворенных веществ, можно отнести ветровую деятельность. Из особенностей гидрологического режима следует отметить тот факт, что Стрелецкая бухта в кутовой своей части подпитывается грунтовыми водами, которые поступают из одноименной балки. В результате здесь формируется устойчивая вертикальная стратификация вод, препятствующая вертикальному обмену и способствующая осаждению и аккумуляции взвеси.

В целом поле содержания ОВВ в Стрелецкой бухте характеризовалось за-

метной неоднородностью. Концентрация этого вещества в водах бухты изменялась в пределах 0,3–2,2 мг/л на поверхности и 0,9–2,6 мг/л в придонном слое (рис. 2). Для сравнения, – в открытых водах Черного моря содержание ОВВ, согласно [4], около 0,2 мг/л. Это значение обычно принимают в качестве природной нормы концентрации исследуемой величины в Черном море.

В рассматриваемой ситуации в поле содержания ОВВ отчетливо обнаруживается ряд локальных максимумов с концентрацией, которая на порядок превышает природную норму, что указывает на их вероятное антропогенное происхождение (рис. 2).

Три, наиболее значимых максимума концентрации ОВВ, были условно приняты нами в качестве источников данного вещества. Это (1) локальный максимум в кутовой части бухты, который мы связываем с эксплуатацией рыболовецких маломерных судов кооператива «Причал 75»; (2) экстремум, находящийся между стоянками CC1 и CC2; (3) локальный максимум ОВВ, расположенный у берега в северо-западной части бухты в месте выпуска хозяйственно-бытовых вод (рис. 1, 2). Очевидно, что все три источника взвеси имеют антропогенную природу.

Ниже на модельном уровне проанализирована динамика взвеси на акватории бухты, которую генерирует каждый из выявленных источников.

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 [2, 3].

На поверхности моря, представляющей собой поверхность тока, касательное напряжение ветра уравнивается турбулентным трением в морской воде. На дне принимается условие прилипания.

Рис. 2. Содержание общего взвешенного вещества, мг/л в верхнем (а) и придонном (б) слоях в Стрелецкой бухте 11 ноября 2018 г.

Fig. 2. The content of total suspended matter, mg/l in the upper (a) and bottom (b) layers in the Streletskaia Bay on November 11, 2018

На твердых боковых границах бассейна ставится смягченное условие непротекания, т.е. равенство нулю нормальной составляющей полного потока. На открытых жидких границах ставится 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 [5]

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

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

Считаем, что в заданных точках происходит выброс взвеси:

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. Используется положительно определенная, транспортная, консервативная схема. Схемная диффузия исключается применением метода коррекции потоков [6].

Использовалась равномерная сетка с шагами $\Delta x = 8$ м и $\Delta y = 11$ м. По вертикали использовалась 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 $0,5$ см²/с², что соответствует скорости ветра 4 м/с.

Расчеты проводились на трое суток. Нас интересовали не абсолютные величины в особенностях распределений, а динамика трансформации этих распре-

делений. Расчеты выполнены для восьми основных румбов направления ветра. Рассматривались три обнаруженных по результатам экспедиции и описанных выше возможных источника взвеси, расположенные в придонном слое (на глубинах 2, 6 и 17 м). На рис. 4, 5 красными точками показано положение источников. Расчет по каждому проводился от-

дельно, затем результаты были просуммированы по всем направлениям ветра.

Рассмотрим один из ситуационных вариантов, случай северо-восточного ветра (рис. 3). Течения на поверхности (~ 5 см/с) и в придонном слое (~ 1 см/с) ориентированы в противоположном направлении.

Рис. 3. Векторы течений в поверхностном и придонном слоях моря при северо-восточном ветре

Fig. 3. Current vectors in the surface and bottom layers of the sea with a northeast wind

На рис. 4 представлено распределение взвеси от всех трех рассматриваемых источников в каждом слое. Здесь пространственное распределение взвеси показано с шагом 5% от максимального значения этого источника в данном слое. 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, показанной в данном моделировании.

Взвесь от первого и второго источников (нумерация источников на рисунке снизу – вверх) запирается практически в кутовой части бухты для первого источ-

ника и в пределах и ближайших окрестностях места сброса для второго источника (что обусловлено в значительной степени орографией берега). От третьего источника (северо-западная часть бухты) взвесь придонным течением переносится в направлении восточного берега, вблизи которого осуществляется подъем вод. Затем в верхнем слое происходит перенос ОВВ поверхностным течением в противоположном направлении.

В поверхностном слое суммарное (для всех основных направлений ветра) распределение взвеси показано на рис. 4 на фоне батиметрии бухты с шагом 4 м (мах – 21 м). Зоны максимального влияния для источников 1 и 2 находятся вблизи этих источников.

Рис. 4. Распределение взвеси от источников по слоям при северо-восточном ветре.
Суммарное распределение в поверхностном слое для ветров восьми основных румбов
(цветом выделены границы слоев)

Fig. 4. The distribution of suspended matter from the sources in layers with a northeast wind.
The total distribution in the surface layer for the winds of eight main points
(the borders of the layers are highlighted in color)

Для источника 3 зона влияния локализуется в двух местах вдоль западной береговой черты. Изолинии показаны с шагом 5% от максимума в слое.

В придонных слоях суммарное распределение взвеси представлено для каждого источника отдельно на рис. 5. Изолинии во всех слоях показаны с шагом 1% от максимума в источнике.

Рис. 5. Распределение взвеси в придонных слоях для каждого источника отдельно, цветом выделено разбиение по слоям (3–5 слою)

Fig. 5. Suspension distribution in the bottom layers for each source separately, colored division into layers (3–5 layers)

Границы слоев изображены градицией цвета от белого к голубому.

Видно, что для первого источника наблюдается задержание взвеси в кутовой части бухты. В окрестности второго источника в придонной области отмечается постепенный вынос ОВВ в центральную часть. Для третьего источника вынос взвеси возможен в любом направлении, в зависимости от розы ветров с незначительным преобладанием распространения вдоль бухты и, соответственно, отложения в придонной прибрежной ее части для первого слоя, как отмечалось выше.

Заключение. На базе данных экспедиции, проведенной в ноябре 2018 г., проанализирована структура поля концентрации ОВВ и определены источники этого вещества в водах Стрелецкой бухты. По результатам численного моделирования выявлены закономерности распространения и аккумуляции взвеси в системе локальных течений от реально существующих источников в зависимости от ветровой деятельности.

В качестве источников взвеси приняты три наиболее значимых локальных максимума концентрации данного вещества. Это (1) локальный максимум в кутовой части бухты, который мы связываем с деятельностью кооператива рыболовецких маломерных судов «Причал 75»; (2) экстремум, находящийся между стоянками судов; (3) локальный максимум, который расположен у берега в северо-западной части бухты, в месте выпуска хозяйственно-бытовых вод. Все источники взвешенного вещества имели антропогенное происхождение.

Численный эксперимент показал следующее. Перенос взвеси в Стрелецкой бухте осуществляется как в системе придонных и поверхностных течений, так и вертикальными потоками. В верхнем слое вод зоны максимального влияния расположенных в западной части бухты двух источников ОВВ небольшие и находятся вблизи этих источников. Зона влияния третьего источника локализована в двух местах вдоль западной береговой линии. В придонном слое для

первого источника наблюдается запыление взвеси в кутовой части бухты. Для второго источника у дна отмечается постепенный вынос ОВВ в ее центральную часть. Для третьего источника перенос взвеси возможен в любом направлении, в зависимости от розы ветров, с небольшим преобладанием распространения взвешенного вещества вдоль бухты и, соответственно, его отложения у дна в прибрежной области.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-45-920068.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стрелецкая бухта* – повседневное лицо Севастополя. URL: <http://krymania.ru/streleckaya-buhta-v-sevastopole/#name2> (дата обращения: 04.01.2020).
2. *Шати́ро Н.Б.* Моделирование течений на севастопольском взморье // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2006. Вып. 14. С. 119–134.
3. *Шати́ро Н.Б., Ющепко С.А.* Моделирование ветровых течений в севастопольских бухтах // *Морской гидрофизический журнал*. 1999. № 1. С. 42–57.
4. *Хайлов К.М.* Экологический метаболизм в море. Киев: Наукова Думка, 1971. 250 с.
5. *Михайлова Э.Н., Шати́ро Н.Б., Ющепко С.А.* Моделирование распространения пассивной взвеси в севастопольских бухтах // *Морской гидрофизический журнал*. 1999. № 3. С. 29–42.
6. *Жмакин А.И., Фурсенко А.А.* Об одной монотонной разностной схеме сквозного счета // *ЖВМиМФ*. 1980. 20, № 4. С. 1021–1031.

FIELD OF CONCENTRATION AND DYNAMICS OF TOTAL SUSPENDED MATTER AT THE SOUTHWESTERN COAST OF CRIMEA ON THE BASIS OF NATURAL OBSERVATIONS 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

Based on the expedition data organized by the Russian Geographical Society (Sevastopol) and carried on by employees of the Marine Hydrophysical Institute and the Institute of Natural and Technical Systems in November 2018, sources are found and patterns of the structure of the concentration field of total suspended matter in coastal areas off the Crimean peninsula south-west coast are analyzed. For each of the identified sources, a numerical simulation of the suspension propagation process and accumulation in the system of local currents depending on wind activity is performed. The scales of influence zones of anthropogenic suspension are estimated. Probable places of its accumulation are determined.

Keywords: total suspended matter, suspension distribution and accumulation, Crimean peninsula, Black Sea.