

Система течений в бухте Круглой (Крым) на основе численного моделирования и данных наблюдений

П. Д. Ломакин*, Ю. Н. Рябцев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: p_lomakin@mail.ru*

Аннотация

На основе численного моделирования с использованием трехмерной баротропной линейной модели Фельзенбаума выявлены закономерности структуры локальной системы течений в зависимости от ветра в бухте Круглой. Установлено, что, независимо от направления ветрового потока, системе ветровых течений в целом присущ ряд общих свойств, а для каждой конкретной ветровой ситуации она отличается собственными признаками. Показано, что в глубоководной части исследуемой бухты система течений двухслойная, а в мелководной кутовой области – однослойная. Независимо от ветровой ситуации в центре бухты, в районе обширного поднятия дна наблюдается топографическая вихревая ячейка. Ветры северной четверти вызывают нагонный эффект, развитую циркуляцию и обеспечивают хороший водообмен с открытой частью моря. Ветры южной четверти обуславливают слабо выраженный сгонный эффект. Зональные ветры генерируют слабые зональные течения, препятствующие водообмену между бухтой и морем. Результат моделирования сопоставлен с данными инструментальных наблюдений за течениями в бухте Круглой в условиях ветра северной четверти. Показано хорошее соответствие расчетной системы течений и схемы течений, полученной по данным наблюдений.

Ключевые слова: ветер, течения, моделирование, сгонно-нагонные явления, бухта Круглая, Крым

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н. Система течений в бухте Круглой (Крым) на основе численного моделирования и данных наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 79–89. EDN ULTQHH. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-79-89

© Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., 2022



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

Current System in Kruglaya Bay (Crimea) Based on Numerical Simulation and Observation Data

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

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

*e-mail: p_lomakin@mail.ru

Abstract

On the basis of numerical modeling using the 3D barotropic linear Felsenbaum model, regularities of the structure of currents local system in Kruglaya Bay depending on the wind was revealed. It is established that, regardless of the wind flow direction, a number of general properties are inherent in the system of wind currents, and for each specific wind situation it has its own characteristics. It is shown that in the deep-water part of the investigated bay, the system of currents is two-layer, and in the shallow apex area, it is one-layer. Regardless of the wind situation, a topographic eddy cell is observed in the center of the bay in the area of extensive bottom uplift. The northern quarter winds cause a surge effect, developed circulation and ensure good water exchange with the open sea. The southern quarter winds are responsible for a weakly pronounced surge effect. Zonal winds generate weak zonal currents that impede water exchange between the bay and the sea. The simulation result is compared with the instrumental observations data of currents in Kruglaya Bay in northern quarter wind conditions. A good similarity is shown between the calculated system of currents and the flow scheme obtained from observational data.

Keywords: wind, currents, modeling, surge phenomena, Kruglaya Bay, Crimea

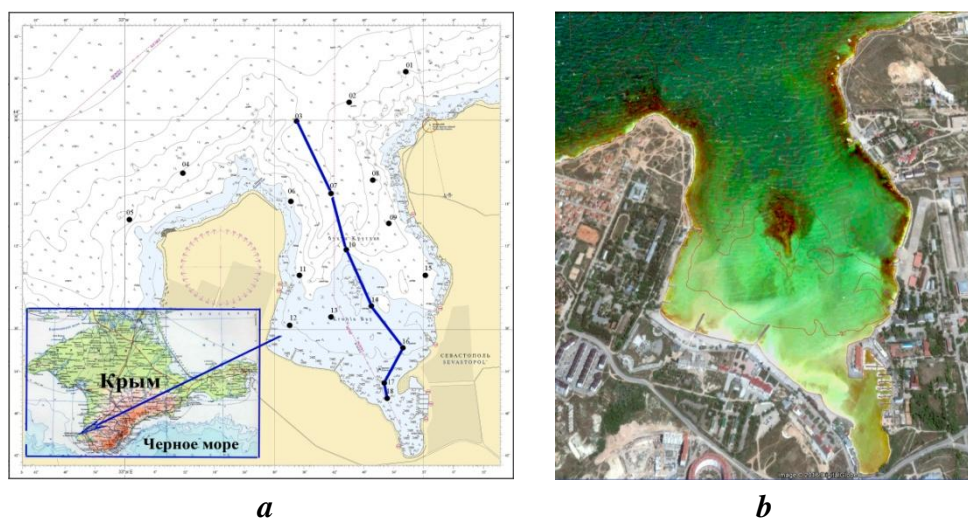
Acknowledgements: the research is performed under state task on topic no. 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”.

For citation: Lomakin, P.D. and Ryabtsev, Yu.N., 2022. Current System in Kruglaya Bay (Crimea) Based on Numerical Simulation and Observation Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 79–89. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-79-89

Введение

Бухта Круглая (другое название Омега) расположена на юго-западном побережье Крымского полуострова, в южной части севастопольского взморья, между бухтами Абрамовой и Стрелецкой. Бухта меридионально ориентирована и свободно сообщается с морем. Протяженность ее осевой линии около 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, ограничена от центральной области двумя мысами (рис. 1).

Одна из морфометрических особенностей исследуемой бухты, определяющая динамику вод и взвешенного вещества, а также структуру полей океанологических величин, – расположенное в центральной области обширное каменистое и частично занесенное песком поднятие дна, которое хорошо различимо на спутниковых снимках в видимом диапазоне (рис. 1, *b*). При штормовом волнении и крупной зыби его вершина выходит на поверхность моря [1].



Р и с . 1 . Географическое положение бухты Круглой со схемой станций океанологических съемок (а); спутниковый снимок бухты (b)

Fig . 1 . Geographic position of Kruglaya Bay with the oceanologic survey station map (a); satellite image of the bay (b)

Круглая – одна из немногих бухт севастопольского взморья, где расположены городские пляжи. Она представляет интерес с рекреационной точки зрения, особенно в современных условиях возрастающей антропогенной нагрузки, поэтому сведения о гидрологическом режиме бухты, в частности о закономерностях системы течений, представляются весьма актуальными.

В настоящее время в этой бухте и на смежных участках взморья ведутся комплексные океанологические исследования. Так, в течение трех последних лет здесь был проведен ряд съемок и серий береговых наблюдений за основными гидрофизическими и гидрохимическими параметрами среды. На основе анализа полученных данных сформировалось представление о течениях, структуре и временной изменчивости полей основных океанологических величин, источниках загрязнения, объемах сточных вод, химическом составе загрязняющих веществ [1–5]. В работе [6] выполнено численное моделирование процесса распространения взвешенного вещества из реально существующего источника. В настоящей статье сложившееся знание расширено и дополнено результатом численного моделирования локальной системы течений.

Цель работы – на основе численного моделирования раскрыть закономерности локальной системы течений в зависимости от ветровых условий в бухте Круглой и сопоставить полученный результат с данными инструментальных наблюдений за течениями.

Исходные данные и методы исследования

Для расчета течений использована обобщенная, на случай учета рэлеевского трения, трехмерная баротропная линейная модель Фельзенбаума [7, 8]. Отметим, что численное моделирование гидрологических процессов в аналогичных бассейнах традиционно применяется для понимания закономерностей, выявленных на основе данных натуральных наблюдений [9, 10].

В подобных моделях решение трехмерной задачи о течениях сводится к решению двумерной задачи для интегральной функции тока. Компоненты скорости течения вычисляются по аналитическим формулам, что позволяет проводить расчеты на сравнительно мелкой сетке и описывать особенности прибрежных течений и течений в бухтах. Подробности алгоритма и использованные параметры изложены в работе [8].

Численные эксперименты проведены для восьми основных румбов ветра скоростью 8 м/с на срок 2 сут. Течения рассчитывались послойно, от верхнего до придонного слоя, в условиях реального рельефа дна.

Результат моделирования сопоставлен со схемами векторов течений, полученных по материалам двух океанологических съемок, выполненных в августе и ноябре 2019 г. [1, 2].

Обсуждение результатов

Результат численного моделирования системы течений в верхнем и придонном слоях бухты продемонстрирован для меридиональных (рис. 2, 3) и зональных (рис. 4) ветров.

Анализ векторных полей (рис. 2–4) показал, что, независимо от ветровой ситуации, системе ветровых течений в целом в бухте Круглой присущ ряд общих признаков. Вместе с тем меридиональные и зональные ветры определяют собственные признаки кинематической структуры вод.

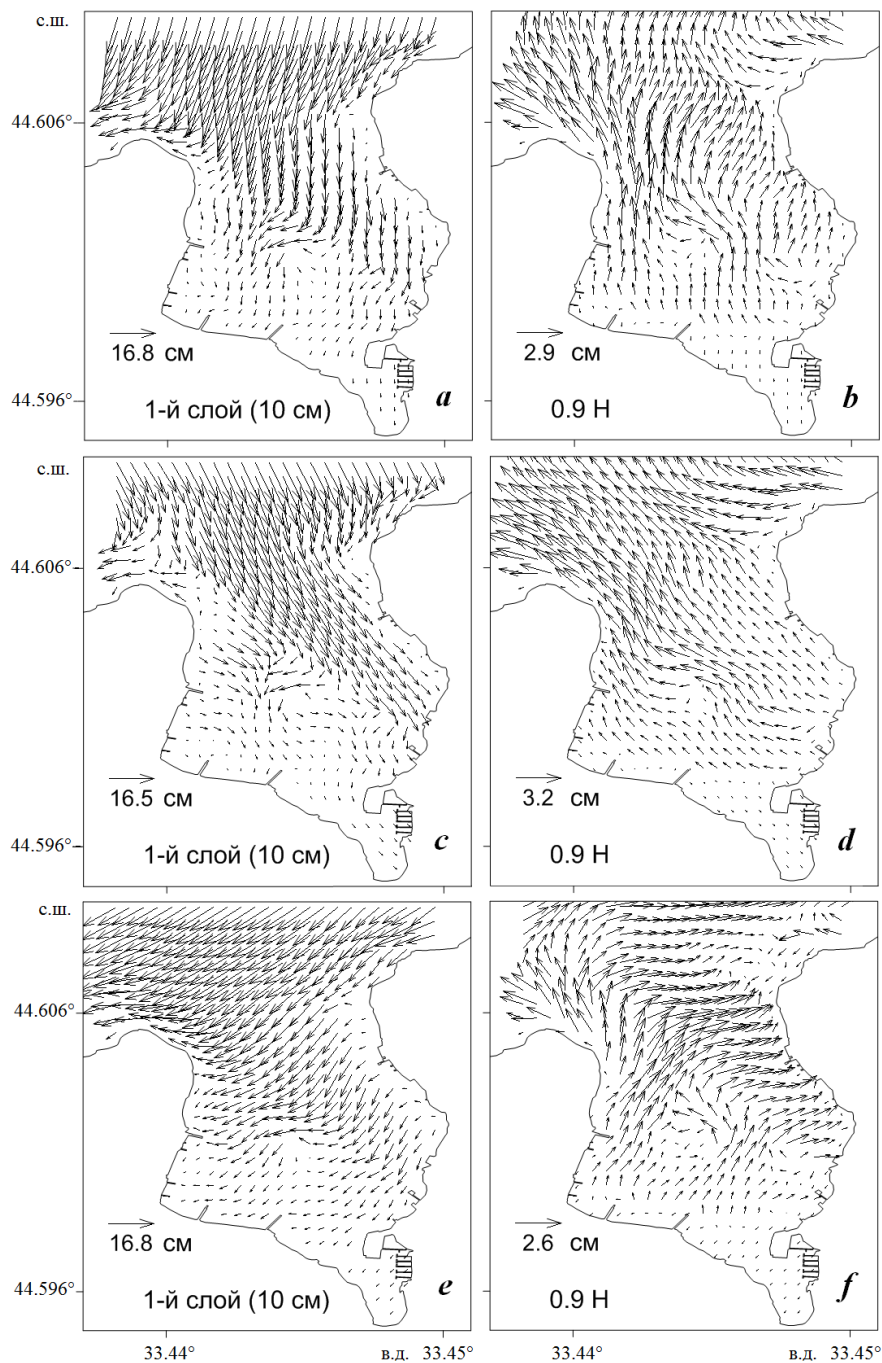
При ветре любого направления в бухте наблюдаются две качественно различные кинематические структуры вод. Двухслойная структура – в глубоководной (центральной и открытой) области и однослойная – в мелководной кутовой части. В глубоководной области в верхнем слое вод векторы течения ориентированы по ветру, а в придонном слое – в противоположном направлении. В мелководной кутовой части как на поверхности моря, так и у дна векторы течений ориентированы по ветру.

В каждой расчетной ветровой ситуации в районе поднятия дна в поле векторов течений во всей толще вод отмечена вихревая ячейка с преимущественной антициклонической составляющей. Это топографическое квазистационарное вихревое образование формируется в результате взаимодействия течений с поднятием дна и препятствует меридиональному обмену между бухтой и открытой акваторией севастопольского взморья (рис. 2–4).

Ниже показано, что ветры всех направлений (кроме восточного) генерируют в рассматриваемой бухте сгонно-нагонные явления, характер которых определяется направлением ветрового потока, а интенсивность – разгоном ветра.

Ветры северной и южной четверти вызывают, соответственно, нагонный и сгонный эффекты на всей акватории бухты. Зональные ветры – нагон вдоль наветренного берега бухты и сгон вдоль противоположного подветренного берега.

Ветры северной четверти (северный, северо-западный, северо-восточный) отличаются максимальным разгоном и вызывают нагонный эффект в бухте Круглой. Вследствие разгона при этих ветрах система течений в бухте наиболее развита. Расчетная скорость течений наибольшая, 10–17 см/с на поверхности и 5–12 см/с у дна, по сравнению с ситуациями, обусловленными другими ветрами. Северные ветры обеспечивают вентиляцию всей бухты и наилучший водообмен с открытой частью моря (рис. 2).



Р и с . 2 . Поле векторов течений в бухте Круглой, генерируемых ветрами северной четверти, в верхнем (слева) и в придонном (справа) слоях: *a, b* – ситуация в условиях северного ветра; *c, d* – в условиях северо-западного ветра; *e, f* – в условиях северо-восточного ветра

Fig . 2 . Vector field of currents generated in Kruglaya Bay by northern quarter winds in the upper (left) and bottom (right) layers: *a, b* – situation under north wind; *c, d* – under north-west wind; *e, f* – under north-east wind

Ветры южной четверти (южный, юго-западный, юго-восточный) обуславливают сгонный эффект. Однако, вследствие ограниченного ветрового разгона, этот эффект, как правило, слабо выражен. По данным эпизодических наблюдений в пляжной зоне, сгонные южные ветры в исследуемой бухте не вызывают более или менее значительных колебаний температуры воды, их размах в пределах 1 °С. Расчетная скорость течений в бухте при ветрах южной четверти 7–15 см/с в верхнем слое и 3–7 см/с у дна (рис. 3).

Зональные (западный и восточный) ветры отличаются минимальным разгоном. Западный ветер вызывает сгон у западного берега бухты и нагон у восточного. Восточный ветер – сгон у восточного берега и нагон у западного. При зональных ветрах расчетная скорость течения минимальна: 5–12 см/с на поверхности и 2–3 см/с у дна, преобладают зональные потоки и, соответственно, ограниченный водообмен между бухтой и морем (рис. 4).

Отметим интересную, характерную для Севастополя, локальную атмосферную синоптическую ситуацию. При восточных ветрах над Крымом в районе Севастополя вследствие орографического эффекта, восстанавливается 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*. Поэтому в городе и в районе исследуемой бухты никогда не бывает умеренного и сильного восточного ветра. Реальный столь слабый ветровой поток, наблюдаемый при восточном положении, вряд ли способен к генерации более или менее устойчивой системы течений, а вариант расчета на рис. 4, *c*, *d* – чисто теоретическая, не существующая в природе ситуация.

Все имеющиеся в нашем распоряжении эмпирические сведения подтверждают известное положение [11] о преимущественно ветровой природе течений в бухтах Севастополя.

На рис. 5 приведены схемы векторов течений, построенные по результатам двух экспедиций в бухту Круглую, которые проводились в августе и ноябре 2019 г. Первая съемка была выполнена в условиях слабого северо-восточного ветра, вторая – слабого северо-западного.

Прежде чем приступить к анализу локальной системы течений в исследуемой бухте по данным фактических наблюдений, необходимо учесть следующее. Течение, генерируемое слабым ветром, неустойчиво. Его характеристики изменяются соответственно вариациям параметров ветрового потока, которые обязательно присутствовали при каждой съемке (~ 10 часов).

Поэтому разнесенные во времени векторы могут относиться к разным фрагментам изменявшейся в ходе съемок кинематической структуры и не соответствовать реальной циркуляции вод.

Судя по направленным по нормали к берегу векторам течений на станциях, которые были расположены непосредственно у береговой линии, течения в исследуемой бухте имеют достаточно выраженную сейшевую составляющую. Вероятна также значимая случайная составляющая. То есть, векторные схемы, полученные по данным инструментальных наблюдений за течениями (рис. 5), не представляют собой целостной картины, а дают лишь приближенное представление о реальной циркуляции вод в бухте Круглой в условиях слабого ветра северной четверти. Достоверными представляются только сведения о скорости течений.

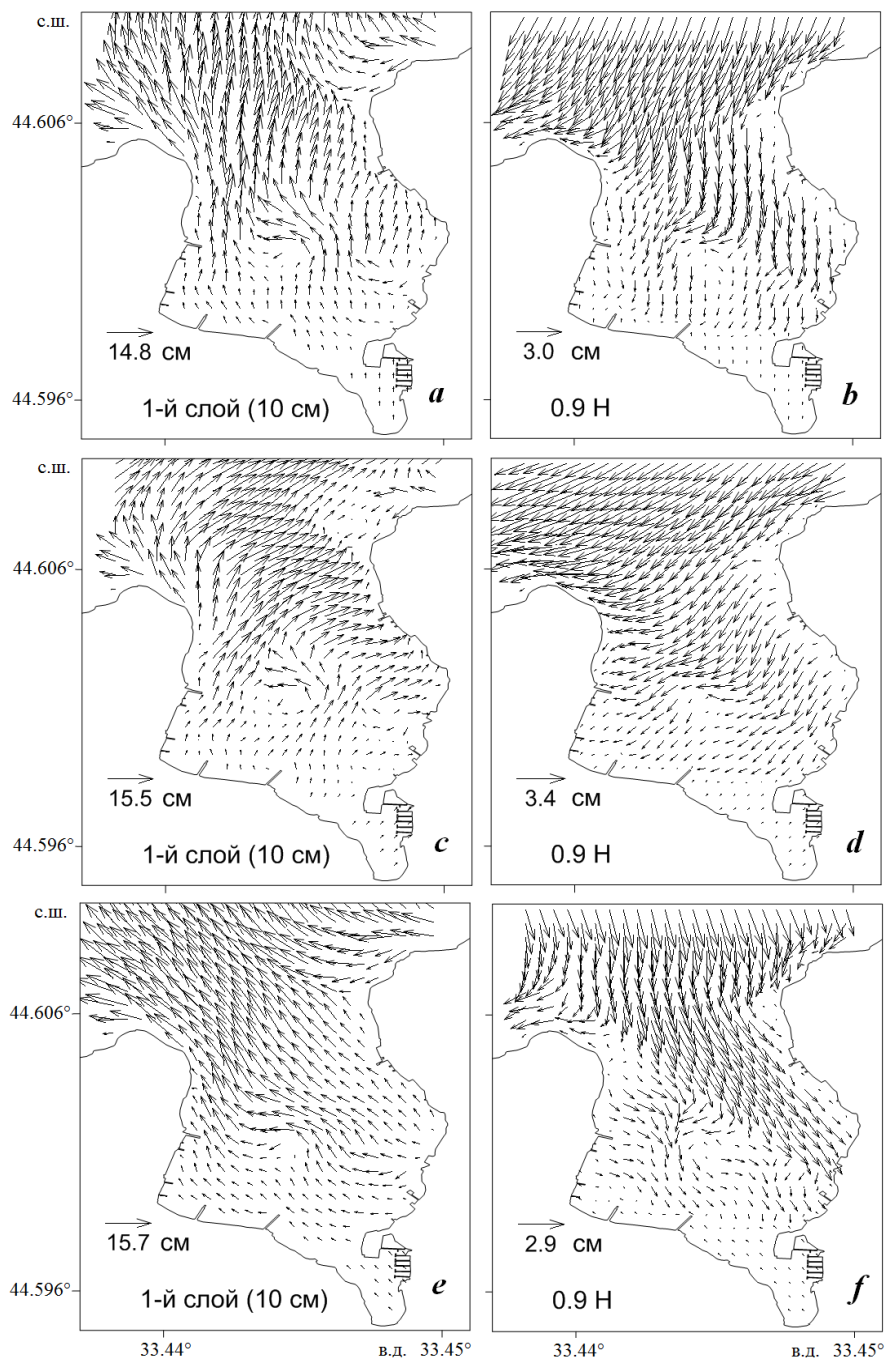


Рис. 3. Поле векторов течений в бухте Круглая, генерируемых ветрами южной четверти, в верхнем (слева) и в придонном (справа) слоях: *a, b* – ситуация в условиях южного ветра; *c, d* – юго-западного ветра; *e, f* – юго-восточного ветра

Fig. 3. Vector field of currents generated in Kruglaya Bay by southern quarter winds in the upper (left) and bottom (right) layers: *a, b* – situation under south wind; *c, d* – under south-west wind; *e, f* – under south-east wind

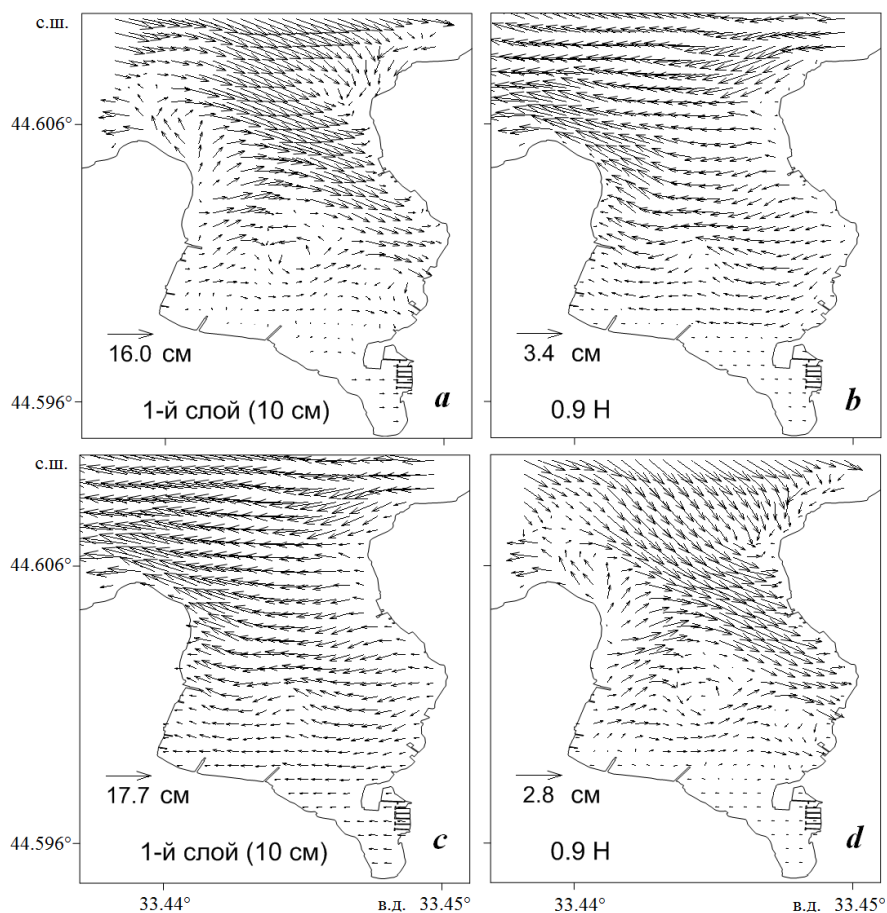


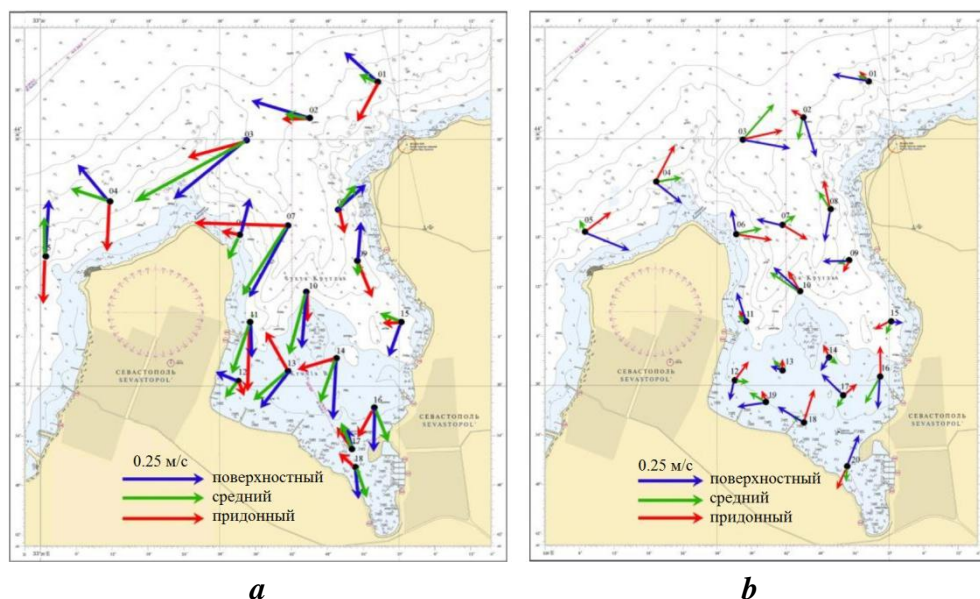
Рис. 4. Поле векторов течений в бухте Круглой, генерируемых зональными ветрами в верхнем (слева) и в придонном (справа) слоях: *a, b* – в условиях западного ветра; *c, d* – в условиях восточного ветра

Fig. 4. Vector field of currents generated in Kruglaya Bay by zonal winds in the upper (left) and bottom (right) layers: *a, b* – situation under west wind; *c, d* – under east wind

В статьях [1, 2] проведено детальное исследование инструментальных наблюдений за течениями в бухте Круглой с привлечением косвенного метода, основанного на анализе структуры полей океанологических величин. Совместно с векторными схемами проанализирована структура термохалинного поля и полей концентрации общего взвешенного вещества и растворенного органического вещества.

В итоге подтверждены свойства локальной системы течений, генерируемой ветром северной четверти в бухте Круглой. Эти свойства были выявлены методом численного моделирования и продемонстрированы на рис. 2.

В частности, это двухслойность кинематической структуры в глубоководной части бухты; интенсивный нагонный эффект; развитая меридиональная циркуляция в глубоководной области со скоростью течений 15–40 см/с в верхнем слое и 10–15 см/с – у дна и около 5 см/с – в кутовой части. В ходе



Р и с . 5 . Векторы течений в районе бухты Круглой: 28 августа (а) и 14 ноября (b) 2019 г

Fig . 5 . Current vectors in Kruglaya Bay: on 28 August (a) and 14 November (b) 2019

обеих съемок в районе поднятия дна в поле векторов течений и в структуре фактических полей океанологических величин зафиксировано отчетливо выраженное вихревое образование (рис. 5), наличие которого показали все варианты модельного эксперимента (рис. 2–4).

В целом в исследуемой бухте преобладает вдольбереговая антициклоническая циркуляция вод и взвешенного вещества. Об этом свидетельствуют распределение глубин вдоль трех пирсов, расположенных на западном берегу бухты, а также особые свойства берега у основания этих сооружений. Пирсы перехватывают ориентированный на север вдольбереговой поток взвеси, омывающий западный берег бухты. Глубина моря вдоль южной стороны пирсов существенно меньше по сравнению с глубиной вдоль северной стороны. У основания пирсов берег намыт с юга, тогда как севернее наблюдается ярко выраженная зона низового размыва.

Заклучение

На основе метода численного моделирования выявлены закономерности структуры локальной системы течений в бухте Круглой, определяемые ветром восьми основных румбов.

Установлено, что, независимо от направления ветрового потока, системе ветровых течений в рассматриваемой бухте присущи следующие свойства: двухслойная структура – в глубоководной области и однослойная – в мелководной кутовой части. В глубоководной области в верхнем слое вод векторы течения ориентированы по ветру, в придонном слое – против ветра. В мелководной кутовой части на поверхности моря и у дна векторы течений ориентированы по ветру. В центральной части бухты, в районе поднятия дна, наблюдается квазистационарное топографическое вихревое образование.

Северные, южные и зональные ветры формируют поля векторов течений с особыми признаками. Ветры северной четверти вызывают нагонный эффект в бухте Круглой. Вследствие максимального разгона при этих ветрах система течений в бухте наиболее развита и обеспечивает хороший водообмен с открытой акваторией моря. Ветры южной четверти обуславливают сгонный эффект, который из-за ограниченного разгона слабо выражен. Зональные ветры отличаются минимальным разгоном и генерируют слабые зональные течения, препятствующие водообмену между бухтой и морем.

Результат моделирования системы течений в бухте, генерируемых ветрами северной четверти, подтвержден данными экспедиционных исследований. В частности, удостоверены такие свойства, как двухслойность кинематической структуры в глубоководной области бухты и однослойность в кутовой части, развитая меридиональная циркуляция, интенсивный нагонный эффект, формирование вихревой ячейки в районе поднятия дна.

В исследуемой бухте преобладает антициклоническая вдольбереговая циркуляция вод и взвешенного вещества.

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. № 4. С. 60–65. EDN ZYOKPW. 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 // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3. С. 15–22. EDN YZQFHX. doi: 10.33075/2220-5861-2020-3-15-22
3. 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
4. Гидрофизические исследования в бухте Круглой (Севастополь) / А. А. Латушкин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 107–122. EDN VNXYIX. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-107-122
5. Ломакин П. Д., Попов М. А., Чепыженко А. А. Оценка состояния морских вод по данным о концентрации окрашенного растворенного органического вещества в бухте Омега (Крым) летом 2020 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 100–108. EDN CWGWAQ. doi:10.52002/0130-2906-2021-11-100-108
6. Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., Чепыженко А. И. Исследование источников и распространения взвешенного вещества в бухте Омега (Крым) на основе экспедиционных данных и численного моделирования // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 3. С. 59–67. EDN VSHGMD. doi:10.33075/2220-5861-2021-3-59-67
7. Шапиро 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.
8. Шапиро Н. Б., Ющенко С. А. Моделирование ветровых течений в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 1. С. 42–57.
9. Фомин В. В., Репетин Л. Н. Численное моделирование ветровых течений и распространения примеси в Балаклавской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 4. С. 43–58. EDN YUHIZF.

10. *Белокопытов В. Н., Кубряков А. И., Пряхина С. Ф.* Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 1. С. 5–15. EDN VVXROK. doi:10.22449/0233-7584-2019-1-5-15
11. *Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б., Ющенко С. А.* Моделирование распространения пассивной примеси в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 3. С. 29–42.

Поступила 22.06.2022 г.; одобрена после рецензирования 16.08.2022 г.; принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

Сведения об авторах:

Ломакин Павел Демьянович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, профессор, **Researcher ID: V-7761-2017**, **Scopus Author ID: 6701439810**, **IstinaResearcherID: 18321047**, *p_lomakin@mail.ru*

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

Заявленный вклад авторов:

Ломакин Павел Демьянович – общая постановка задачи, подбор и интерпретация экспедиционных данных, интерпретация общего результата, написание статьи

Рябцев Юрий Николаевич – выполнение численных экспериментов и интерпретация результатов моделирования, интерпретация общего результата

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.