

Научная статья
УДК 551.465
EDN PRIZHP

Апвеллинг в акватории Черного моря у мыса Лукулл на основе численного моделирования и данных наблюдений

П. Д. Ломакин *, Ю. Н. Рябцев, А. И. Чепыженко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: p_lomakin@mail.ru

Аннотация

На основе методов численного моделирования (использована обобщенная на случай учета рэлеевского трения трехмерная баротропная линейная модель Фельзенбаума) рассмотрены особенности структуры поля векторов течений в зависимости от ветровых условий в ситуации апвеллинга в акватории, расположенной вдоль северного берега Севастопольского взморья, между м. Лукулл и Толстый. Выявленна типичная для апвеллинга двухслойная поперечная ячейка циркуляции вод. В верхнем слое течения ориентированы преимущественно по ветру, в придонном слое – в обратном направлении. Показано, что в анализируемой акватории апвеллинг вызывают северные, северо-восточные, восточные и юго-восточные ветры. Апвеллинги, обусловленные указанными ветрами, различаются локацией и площадью очага. В условиях северо-восточного ветра апвеллинг наиболее интенсивный и распространен во всей рассматриваемой акватории. При юго-восточном ветре апвеллинг формируется на двух небольших по площади участках – в изгибах берега между м. Маргупуло и Лукулл и севернее м. Толстого. Результат моделирования сопоставлен с данными экспедиционных исследований. Обнаружено их хорошее соответствие при северном ветре.

Ключевые слова: ветер, течения, апвеллинг, численное моделирование, термохалинная структура, мыс Лукулл, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовых зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования».

Для цитирования: Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., Чепыженко А. И. Апвеллинг в акватории Черного моря у мыса Лукулл на основе численного моделирования и данных наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 2. С. 67–79. EDN PRIZHP.

© Ломакин П. Д., Рябцев Ю. Н., Чепыженко А. И., 2025



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

Upwelling in the Black Sea Water Area near Cape Lukull Based on Numerical Modeling and Observational Data

P. D. Lomakin *, Yu. N. Ryabtsev, A. I. Chepyzhenko

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

Based on numerical modeling methods (a generalized three-dimensional barotropic linear model of Felsenbaum was used for the case of taking into account Rayleigh friction), the paper considers features of the structure of the current vectors field depending on wind conditions in an upwelling situation in the water area located along the northern coast of the Sevastopol seaside, between Capes Lukull and Tolsty. A two-layer transverse cell of water circulation, typical of upwelling, was identified. The currents were predominantly oriented down wind in the upper layer and in the opposite direction in the bottom layer. It is shown that in the analyzed water area upwelling was caused by northerly, north-easterly, easterly and south-easterly winds. Upwellings caused by the above winds differed in their location and area. Under a north-easterly wind, upwelling was most intense and widespread throughout the water area under consideration. Under a south-easterly wind, upwelling was formed in two small areas: in the bends of the coast, between Capes Margopulo and Lukull and north of Cape Tolsty. The modeling result was compared with data from expeditionary research. Their good agreement under a northerly wind was found.

Keywords: wind, currents, upwelling, numerical modeling, thermohaline structure, cape Lukull, Black Sea

Acknowledgements: The work was performed under state assignment of MHI RAS on topic FNNN-2024-0016 “Studies of spatial and temporal variability of oceanological processes in the coastal, near-shore and shelf zones of the Black Sea influenced by natural and anthropogenic factors on the basis of *in situ* measurements and numerical modelling”.

For citation: Lomakin, P.D., Ryabtsev, Yu.N. and Chepyzhenko, A.I., 2025. Upwelling in the Black Sea Water Area near Cape Lukull Based on Numerical Modeling and Observational Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 67–79.

Введение

Апвеллинг – типичное для океанов и морей явление. Его виды на разных пространственно-временных масштабах довольно хорошо изучены, а результаты исследований отражены в многочисленных публикациях. Это, например, работы [1–6], базирующиеся на анализе экспериментальных контактных и спутниковых данных, и исследования [7, 8], в которых использованы методы численного моделирования. Результаты изучения апвеллинга важны в прикладном плане и находят широкое применение в различных отраслях морской науки.

Согласно [9], сгонно-нагонные явления (соответственно ветровой апвеллинг и даунвельлинг) типичны для севастопольских бухт и открытых участков взморья. Апвеллинг в рассматриваемой небольшой прибрежной акватории исследуется впервые, он интересен и значим в промысловом отношении. Согласно результатам мониторинга черноморского промысла [10], на данном участке во время апвеллинга формируются плотные скопления шпрота, которые успешно облавливаются траулерами среднего тоннажа.

Цели статьи:

- на основе численного моделирования выявить закономерности структуры локальной системы течений в ситуации апвеллинга в зависимости от ветровых условий в акватории, расположенной вдоль северного берега Севастопольского взморья между м. Лукулл и Толстый;
- оценить интенсивность апвеллинга;
- сравнить полученный результат с данными экспедиционных исследований.

Изучаемая акватория – прибрежная зона протяженностью около 12 миль вдоль северного берега Севастопольского взморья, расположенная между м. Лукулл и Толстый (рис. 1).

Приглубый берег – одна из основных морфометрических особенностей рассматриваемой акватории, определяющих динамику вод. Прибрежная мелководная область ограничена достаточно выраженным свалом глубин.

Известно, что в районах с подобным рельефом дна апвеллинг и даунвеллинг формируются как под действием ветров, имеющих нормальную составляющую относительно береговой линии, так и под влиянием ветровых потоков, направленных под острым углом к побережью.

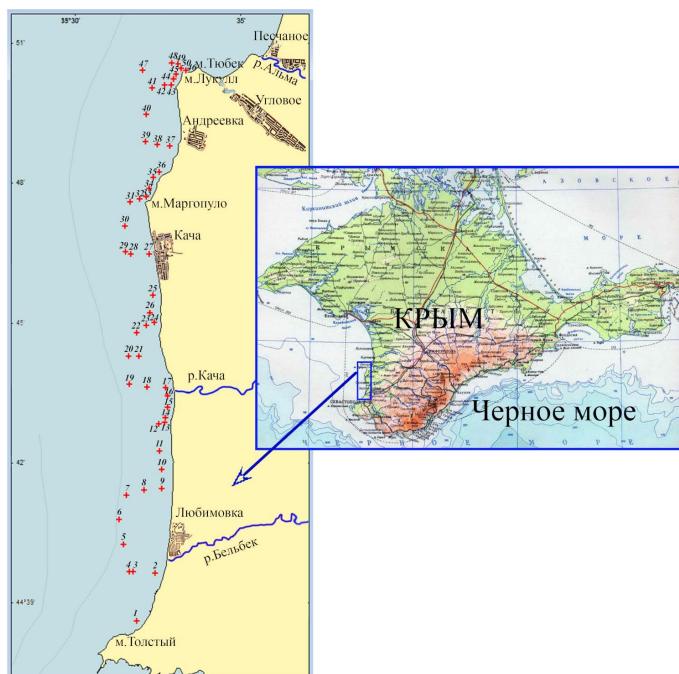


Рис. 1. Географическое положение исследуемого региона и схема станций съемки, выполненной Морским гидрофизическим институтом в сентябре 2019 г.

Fig. 1. Geographical location of the study area and survey station map of the survey performed by Marine Hydrophysical Institute in September 2019

Исходные данные и методы исследования

Постановка задачи

В севастопольских бухтах и на открытых участках взморья преобладают ветровые течения [11, 12]. Поэтому для расчета характеристик течений использована обобщенная на случай учета рэлеевского трения трехмерная баротропная линейная модель¹⁾ Фельзенбаума [12]. Отметим, что численное моделирование гидрологических процессов в подобных бассейнах традиционно используется отечественными [13, 14] и зарубежными [15–17] авторами для понимания закономерностей, выявленных на основе данных натурных наблюдений.

Учитывая, что на шельфе течения достаточно быстро перестраиваются с учетом ветрового воздействия (примерно за сутки), средние течения будем рассчитывать в рамках теории установившихся течений. В предлагаемой модели учитываются основные факторы, влияющие на течения, как то: сила Кориолиса, рельеф дна, конфигурация берега, действие ветра (направление, интенсивность и пространственная неравномерность), придонное и внутреннее трение.

Уравнения линейной теории установившихся течений в однородной жидкости с учетом внутреннего трения, пропорционального скорости течения, запишем в виде

$$\begin{aligned} -fv &= g\zeta_x + Au_{zz} - ru, & fu &= g\zeta_y + Av_{zz} - rv, \\ u_x + v_y + w_z &= 0. \end{aligned}$$

Здесь f – параметр Кориолиса; u, v, w – составляющие скорости течения; g – ускорение силы тяжести; ζ – понижение уровня; A – кинематический коэффициент вертикальной вязкости; r – коэффициент внутреннего трения.

На поверхности моря, представляющей собой поверхность тока, тангенциальное напряжение ветра уравновешивается турбулентным трением в морской воде, так что

$$\text{при } z = 0 \quad Au_z = -\tau_x, \quad Av_z = -\tau_y, \quad w = 0,$$

где τ_x, τ_y – составляющие тангенциального напряжения ветра, отнесенные к плотности морской воды.

На дне принимается условие прилипания, на твердых границах бассейна (на берегу) – условие непротекания, на открытых жидких границах – условие свободного протекания.

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. Расчет проведен послойно для восьми основных румбов умеренных ветров со скоростью 7 м/с в условиях реального рельефа дна. Подробности алгоритма и использованные параметры изложены в работе¹⁾.

¹⁾ Фельзенбаум А. И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. Москва : Изд-во АН СССР, 1960. 126 с.

Данные наблюдений

Для подтверждения репрезентативности результатов численного эксперимента, мы использовали данные съемки, проведенной Морским гидрофизическими институтом (МГИ) 17 сентября 2019 г. при действии северного ветра. Еще четыре съемки рассматриваемого участка Севастопольского взморья, данные которых имеются в нашем распоряжении, были выполнены в штилевую и маловетреную погоду.

Согласно данным гидрометеорологического центра *Wetterzentrale* (URL: <http://old.wetterzentrale.de/topkarten/fsreleur.html>), синоптическая ситуация над Черным морем в течение первой и второй декад сентября 2019 г. определялась восточной периферией Азорского максимума. Над исследуемой акваторией наблюдался умеренный северный ветер со средней суточной скоростью 4–7 м/с.

Съемка выполнена по схеме, включившей 47 дрейфовых станций (рис. 1). Забортные работы проведены с борта маломерного судна «Гладиатор». Диапазон исследованных глубин 4–37 м. Массив исходной эмпирической информации сформирован при помощи зондирующего комплекса «Кондор»²⁾. Температура, соленость и другие параметры состояния водной среды измерялись *in situ* в зондирующем режиме с шагом по глубине 0.1 м. Точность определения температуры ± 0.01 °C, солености ± 0.005 ЕПС. Представления о реальной циркуляции вод под действием северного ветра получены на основе косвенного метода – анализа структуры полей температуры и солености.

Результаты и обсуждение

Как показали результаты модельного эксперимента, апвеллинг наблюдался в четырех из восьми вариантов расчета, соответствующих следующим направлениям ветра: северному, северо-восточному, восточному, юго-восточному.

В условиях действия этих ветров была выявлена двухслойная характерная для апвеллинга поперечная ячейка циркуляции, проявляющаяся оттоком вод от берега в море в верхнем слое и компенсационным потоком в придонном слое. Зоны (очаги) апвеллинга идентифицировались в расчетном поле векторов течений в придонном слое по положению потоков, направленных по нормали к береговой линии (рис. 2–5).

Рассмотрим структуру локальной системы течений для каждого из обозначенных выше направлений ветра.

В верхнем слое вод независимо от направления ветра расчетные векторные поля обладали одинаковым свойством. Течения были ориентированы преимущественно по ветру и имели скорость 5–25 см/с (рис. 2–5).

Северный ветер (рис. 2). В верхнем слое вод наблюдается направленный к югу вдольбереговой поток.

У дна в мористой области течение направлено на северо-восток. По мере приближения к берегу этот поток разворачивается по часовой стрелке,

²⁾ URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 29.04.2024).

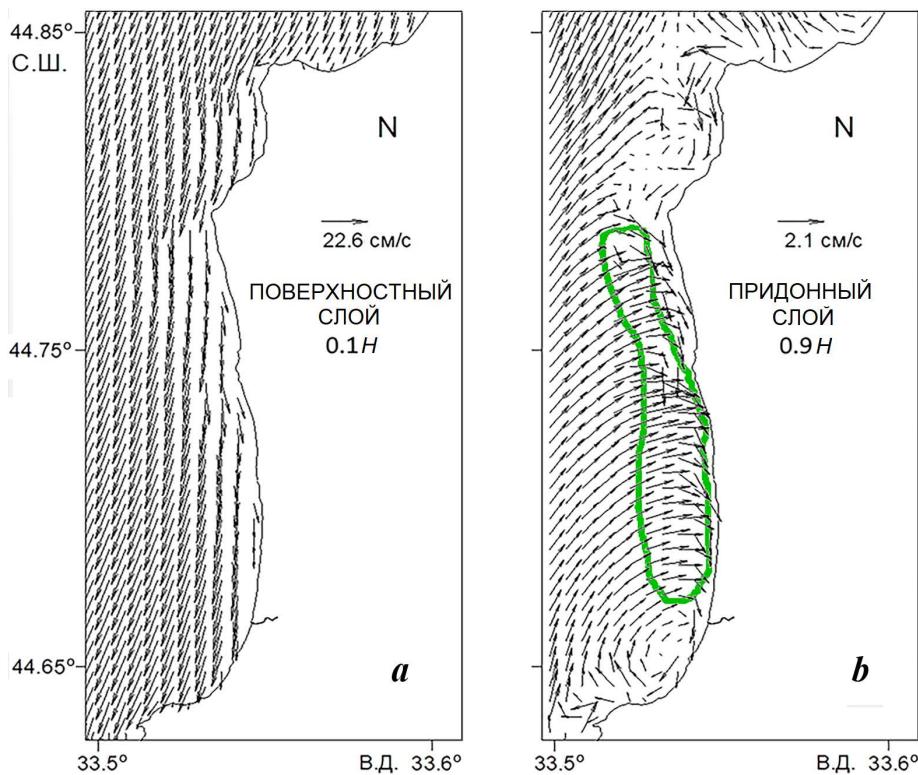


Рис. 2. Векторы течений в поверхностном (а) и придонном (б) слоях в условиях северного ветра. Зеленым контуром обозначен очаг апвеллинга

Fig. 2. Current vectors in the surface (a) and bottom (b) layers under a northerly wind. The upwelling area is contoured in green

обуславливая выход придонных вод на мелководье, где формируется вдольбереговая струя течения южного направления.

Зона апвеллинга площадью ~ 6 кв. миль (протяженность 6 миль и ширина 1 миля) расположена вдоль прямолинейного участка береговой линии, между м. Маргопуло и Толстый. К северу и югу от зоны апвеллинга в изгиба береговой линии наблюдаются две антициклонические вихревые ячейки. Одна – в изгибе берега между м. Маргопуло и Лукулл, другая – севернее м. Толстого (рис. 2, б).

Северо-восточный ветер (рис. 3). В этой ветровой ситуации в верхнем слое на мелководье течение омывает береговую линию и направлено на юго-юго-запад. С удалением от берега оно отклоняется к западо-юго-западу (рис. 3, а).

В придонном слое во всей акватории течение направлено по нормали к берегу, обеспечивая максимальный перенос, подъем и распространение придонных вод на мелководье. Зона апвеллинга имеет максимальную площадь ~ 36 (12 × 3) кв. миль и распространена во всей анализируемой акватории. Вдольбереговые струи течений и вихревые ячейки отсутствуют (рис. 3, б).

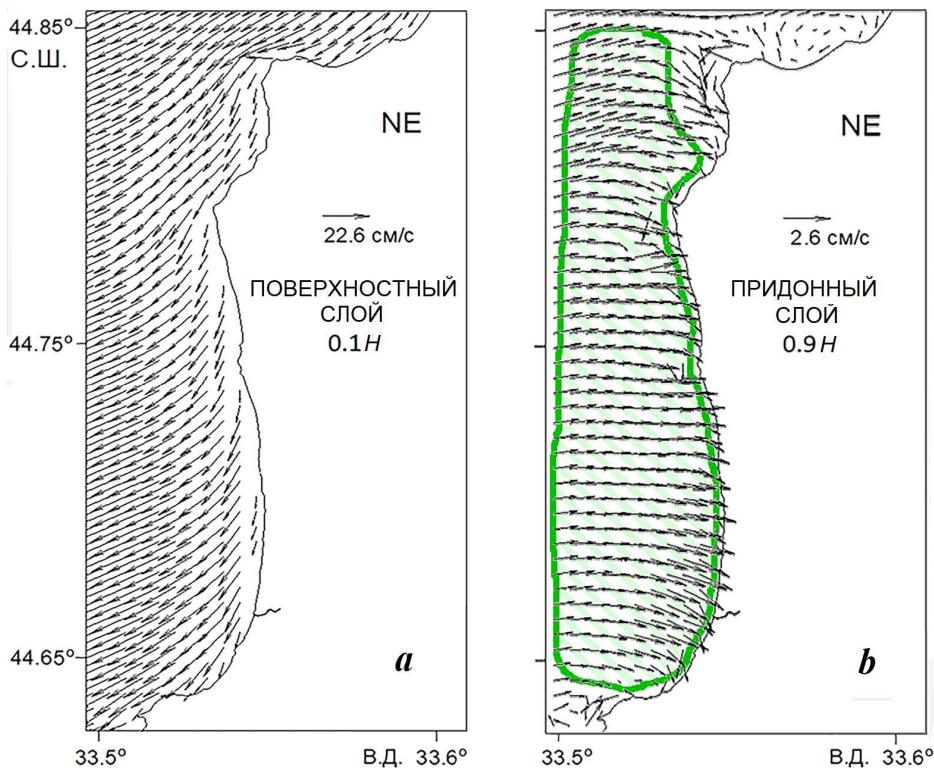


Рис. 3. Векторы течений в поверхностном (а) и придонном (б) слоях в условиях северо-восточного ветра. Зеленым контуром обозначен очаг апвеллинга

Fig. 3. Current vectors in the surface (a) and bottom (b) layers under a north-easterly wind. The upwelling area is contoured in green

В данной ветровой ситуации апвеллинг наиболее интенсивный.

Восточный ветер (рис. 4). Под действием этого ветра в верхнем слое вод течение направлено по ветру с небольшим отклонением влево.

У дна в мористой области течение ориентировано на юго-восток, на мелководье – к берегу. Апвеллинг не столь интенсивен, как в ситуации действия северо-восточного ветра, поскольку перенос вод по нормали к берегу сосредоточен в более узкой прибрежной полосе площадью около 11 (11×1) кв. миль. Явно выраженные вдольбереговые струи течения и вихревые ячейки не наблюдаются (рис. 4, б).

Юго-восточный ветер (рис. 5). В этой ветровой ситуации в верхнем слое моря течение следует на северо-северо-запад.

Апвеллинг формируется на двух небольших участках – в изгибах берега к северу от м. Толстого и между м. Маргопуло и Лукулл. Здесь вектор юго-восточного ветра ориентирован по нормали к береговой линии,

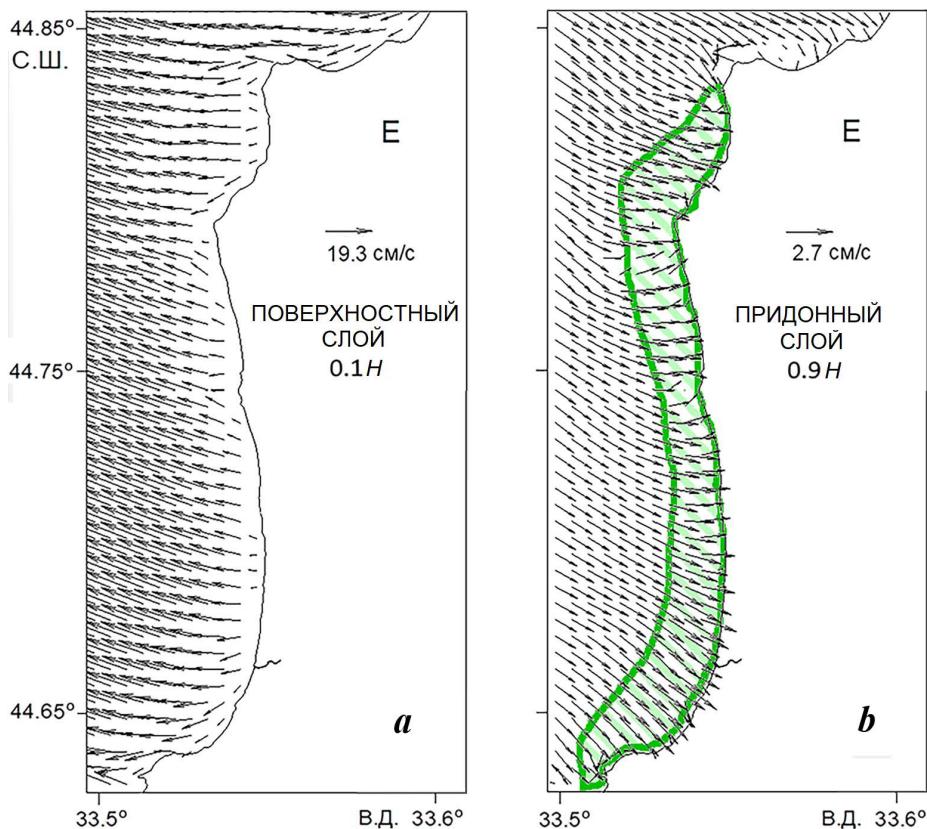


Рис. 4. Векторы течений в поверхностном (а) и придонном (б) слоях в условиях восточного ветра. Зеленым контуром обозначен очаг апвеллинга

Fig. 4. Currents vectors in the surface (a) and bottom (b) layers under an easterly wind. The upwelling area is contoured in green

и вследствие ветрового сгона развиваются два небольших очага апвеллинга. Площадь каждого оценивается в 2–3 кв. мили (рис. 5).

На рис. 6 показано распределение температуры и солености в поверхностном слое моря рассматриваемой акватории в условиях умеренного устойчивого северного ветра. Распределение построено по данным экспедиции МГИ, проведенной 17 сентября 2019 г.

Сравнение элементов термохалинной структуры вод (рис. 6) с результатом численного эксперимента (см. рис. 2) показывает их хорошее соответствие.

На прямолинейном участке между м. Маргопуло и Толстый отчетливо видна прибрежная полоса вод пониженной (на 0.6–0.8 °C) температуры относительно окружающего фона, что могло быть следствием апвеллинга.

В изгибе береговой линии севернее м. Толстого наблюдались локальные экстремумы температуры и солености, что косвенно свидетельствует о присутствии на этом участке вихревой ячейки.

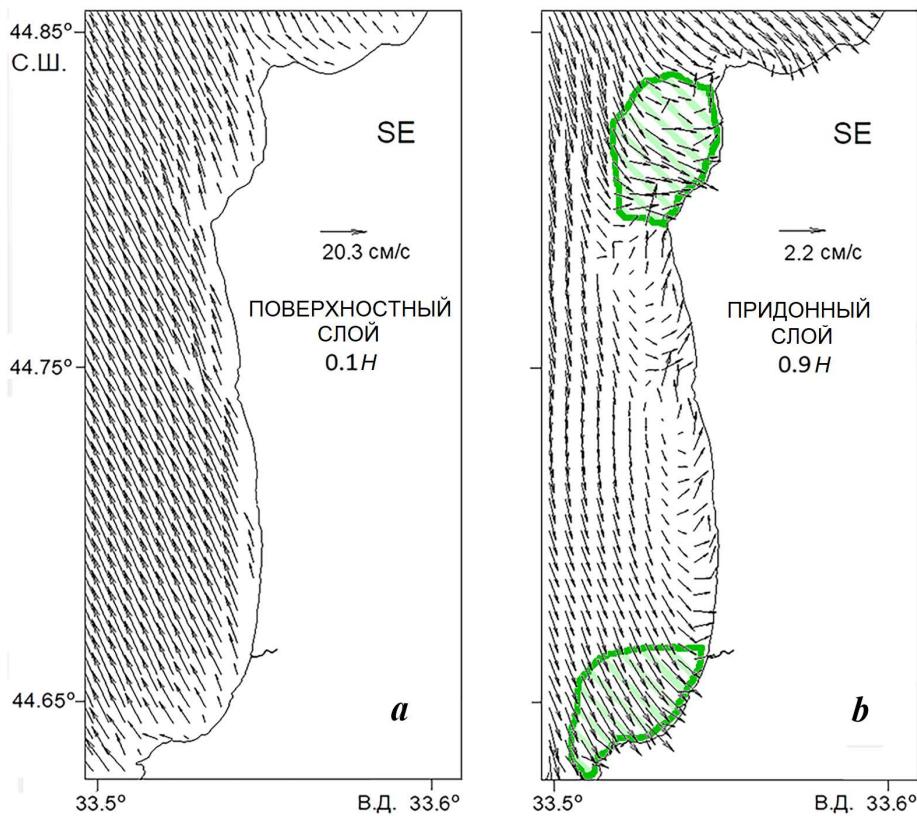


Рис. 5. Векторы течений в поверхностном (а) и придонном (б) слоях в условиях юго-восточного ветра. Зеленым контуром обозначен очаг апвеллинга

Fig. 5. Current vectors in the surface (a) and bottom (b) layers under a south-easterly wind. The upwelling area is contoured in green

Результат численного эксперимента показал, что ветровой апвеллинг – типичное явление для рассмотренной акватории Севастопольского взморья, наблюдаемое в течение значительной части года. Так, согласно розе ветров Севастопольского региона, суммарная повторяемость выявленных нами ветров, вызывающих апвеллинг, в течение всего года равна 49 % (рис. 7).

Соответственно данным комплексного мониторинга промысловой обстановки в Черном море, в районе м. Лукулл (включая исследуемый участок), летом при развитии апвеллинга формируются плотные скопления шпрота, которые облавливаются промысловым флотом. При этом гидродинамические характеристики и температурный режим вод являются надежными предикторами для прогнозирования промысловой обстановки с заблаговременностью 5–7 сут [10].

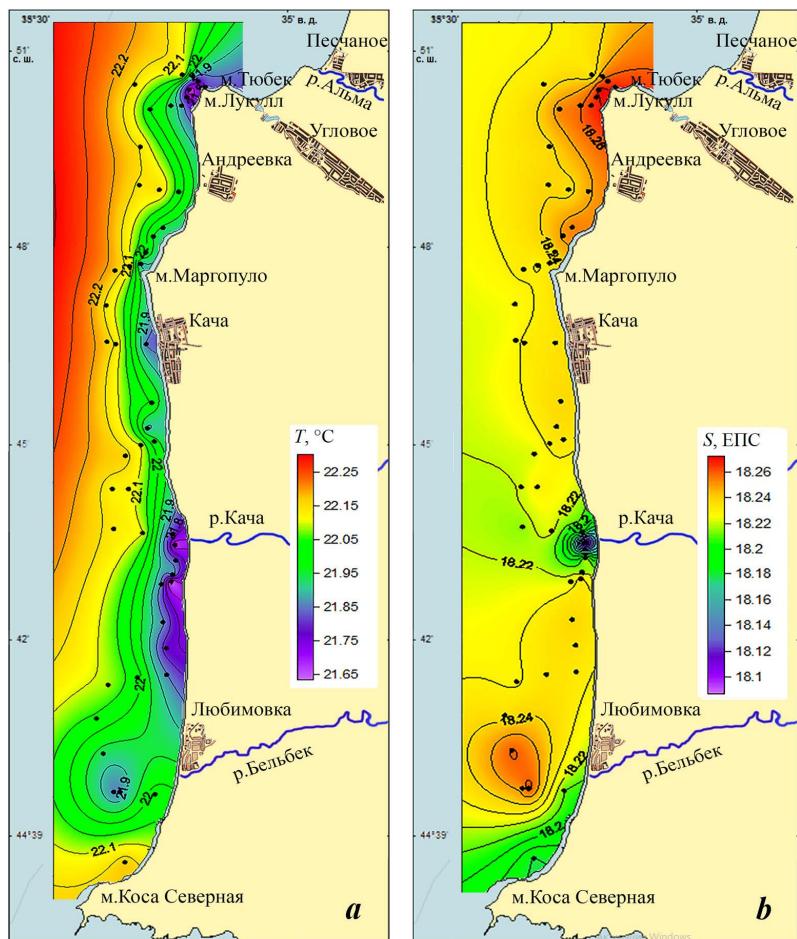


Рис. 6. Распределение температуры (а) и солености (б) в поверхностном слое моря в условиях умеренного устойчивого северного ветра 17 сентября 2019 г.

Fig. 6. Distribution of temperature (a) and salinity (b) in the surface sea layer under a moderate stable northerly wind on 17 September 2019

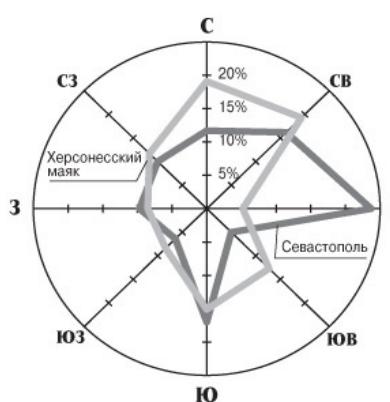


Рис. 7. Роза ветров Севастопольского региона (URL: <https://sevastopol.press/2007/05/24/v-kakuju-storou-veter-duet/>)

Fig. 7. Wind rose of the Sevastopol region
(Adopted from: <https://sevastopol.press/2007/05/24/v-kakuju-storou-veter-duet/>)

Заключение

На основе численных экспериментов рассмотрены особенности апвеллинга в прибрежной акватории Севастопольского взморья между м. Лукулл и Толстый.

Показано, что на анализируемом участке апвеллинг вызывают ветры северного, северо-восточного, восточного и юго-восточного направлений. Апвеллинги, обусловленные указанными ветрами, различаются локацией и площадью очага.

Северный ветер вызывает возникновение апвеллинга на прямолинейном участке береговой линии между м. Маргопуло и Толстый с площадью очага 6 кв. миль. При этом в изгибах берега между м. Маргопуло и Лукулл и севернее м. Толстого формируются две антициклонические вихревые ячейки.

Под действием северо-восточного ветра апвеллинг наиболее интенсивен и распространен во всей рассматриваемой акватории. Его площадь оценивается в 36 кв. миль.

Восточный ветер вызывает апвеллинг, хорошо выраженный, но менее интенсивный по сравнению с ситуацией, определяемой северо-восточным ветром. Его очаг занимает более узкую прибрежную полосу всей рассматриваемой акватории площадью в 11 кв. миль.

При юго-восточном ветре апвеллинг формируется только на двух небольших по площади (2–3 кв. мили) участках – в изгибах берега, между м. Маргопуло и Лукулл, и севернее м. Толстого.

Модельный эксперимент с северным ветром сопоставлен с результатом анализа структуры термохалинного поля по материалам экспедиции МГИ, проведенной в аналогичных ветровых условиях. При сопоставлении подтвердились следующие результаты исследования: на прямолинейном участке исследуемой акватории находится очаг апвеллинга, а в изгибе береговой линии к северу от м. Толстого – вихревая ячейка.

Показано, что ветровой апвеллинг – характерное явление для северной части Севастопольского взморья, наблюдаемое в течение 49 % всего времени года.

Результаты настоящего исследования могут быть использованы для прогнозирования качества промысловой обстановки по вылову шпрота в исследуемой акватории на основе прогноза ветра. Ветры в северном и юго-восточном секторе, которые вызывают апвеллинг, создают более благоприятные условия для промысла по сравнению с ветрами других направлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданова А. К., Корпачев Л. Н. Сгонно-нагонная циркуляция и ее роль в гидрологическом режиме Черного моря // Метеорология и гидрология. 1959. № 4. С. 26–32.
2. Блатов А. С., Иванов В. А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). Киев : Наукова думка, 1992. 241 с.
3. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря / А. И. Гинзбург [и др.] // Исследование Земли из космоса. 1997. № 6. С. 66–72.
4. Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе данных спутникового мониторинга / Р. В. Боровская [и др.] // Исследования Земли из космоса. 2008. № 2. С. 26–36. EDN IJUSQN.
5. Csanady G. T. Intermittent “full” upwelling in Lake Ontario // Journal of Geophysical Research. 1977. Vol. 82, iss. 3. P. 397–419. <https://doi.org/10.1029/JC082i003p00397>
6. Распределение взвешенного вещества у западного побережья Крыма при воздействии сильных ветров различных направлений / А. А. Александрова [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 74–88. EDN ZIPMWT. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019274-88>
7. Косырев В. К., Михайлова Э. Н., Станичный С. В. Апвеллинг в Черном море по результатам численных экспериментов и спутниковым данным // Морской гидрофизический журнал. 1996. № 5. С. 34–46.
8. Sur H. İ., Özsoy E., Ünlüata Ü. Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // Progress in Oceanography. 1994. Vol. 33, iss. 4. P. 249–302. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0079-6611(94)90020-5)
9. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ, 2006. 90 с. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologohidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 11.05.2024).
10. Панов Б. Н, Спиридонова Е. О. Возможности краткосрочного прогнозирования вылова черноморского шпрота у западных берегов Крыма // Водные биоресурсы и среда обитания. 2021. Т. 4, № 2. С. 80–88. EDN ZMEUIX. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2021_4_2_80
11. Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б. Ющенко С. А. Моделирование распространения пассивной взвеси в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 3. С. 29–42.
12. Шапиро Н. Б. Моделирование течений на севастопольском взморье // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2006. Вып. 14. С. 119–134. EDN ZBOAEP.
13. 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.
14. Белокопытов В. Н., Кубряков А. И., Пряхина С. Ф. Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2019. № 1. С. 5–15. EDN VVXROK. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-1-5-15>

15. *Burchard H., Rennau H.* Comparative quantification of physically and numerically induced mixing in ocean models // Ocean Modelling. 2008. Vol. 20, iss. 3. P. 293–311. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2007.10.003>
16. *Hofmeister R., Beckers J.-M., Burchard H.* Realistic modeling of the exceptional inflows into the central Baltic Sea in 2003 using terrain-following coordinates // Ocean Modelling. 2011. Vol. 39, iss. 3–4. P. 233–247. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.04.007>
17. Plume spreading test case for coastal ocean models / V. Fofanova [et al.] // Geoscientific Model Development. 2021. Vol. 14, iss. 11. P. 6945–6975. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6945-2021>

Поступила 26.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 17.02.2025 г.;
принята к публикации 25.03.2025 г.; опубликована 30.06.2025 г.

Об авторах:

Ломакин Павел Демьянович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, профессор, ResearcherID: V-7761-2017, Scopus Author ID: 6701439810, SPIN-код: 5419-9884, p_lomakin@mail.ru

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

Чепыженко Алексей Ильич, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, SPIN-код: 3599-9653, ecodevice@yandex.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

Чепыженко Алексей Ильич – организация и проведение экспедиции, сбор, обработка и анализ данных наблюдений, интерпретация общего результата

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.