

Интенсивность прибрежных апвеллингов Южного берега Крыма и их влияние на кислородный режим акватории

Е. Е. Совга^{1*}, Т. В. Хмара¹, И. В. Мезенцева²

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова, Севастополь, Россия

* e-mail: science-mhi@mail.ru

Аннотация

Проанализированы многолетние данные Банка океанологических данных МГИ за весенне-летние сезоны (май – сентябрь) 1986–2000 и 2007–2023 гг., оценены условия возникновения апвеллингов, их продолжительность, влияние на изменение температурного и кислородного режимов и содержание биогенных элементов в акватории Голубого и Ялтинского заливов. В указанные периоды обнаружено 14 апвеллингов. Объем проанализированных данных составил 3288 значений глубины, температуры, плотности, содержания кислорода и биогенных элементов. Апвеллинги, зафиксированные в первый период (1986–2000 гг.), отмечены только в акватории Ялтинского залива, для них характерны большие перепады температуры, существенные изменения плотности воды, а для майских апвеллингов – очень высокие значения содержания кислорода. Анализ современной базы данных МГИ с 2007 по 2023 г. позволил выявить апвеллинги в акватории Голубого залива, включая район расположения стационарной океанографической платформы, в июле 2007 г., мае 2010, 2012 и 2013 гг., июне и сентябре 2013 г. и июне 2021 г. В результате сравнения температуры, плотности прибрежных вод и содержания в них кислорода за май, июнь 2012, 2013 гг. и июнь 2021 г. сделан вывод о существенном снижении интенсивности апвеллингов, причины которого пока неясны и могут стать предметом дальнейших исследований. Рассматриваются различия в содержании биогенных азота и фосфора в прибрежных акваториях Южного берега Крыма в периоды прохождения апвеллингов. Эти различия проявились в увеличении содержания минеральных форм фосфора и незначительном изменении содержания минеральных комплексов азота. Анализ используемой базы данных за указанные периоды показал недостаточность целевых измерений и необходимость корректировки системы мониторинга, особенно в весенне-летний период, когда максимальна вероятность возникновения апвеллингов.

Ключевые слова: прибрежный апвеллинг, Южный берег Крыма, температурный режим, кислородный режим, биогенные элементы

© Совга Е. Е., Хмара Т. В., Мезенцева И. В., 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

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 шельфовой зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования».

Для цитирования: Совга Е. Е., Хмара Т. В., Мезенцева И. В. Интенсивность прибрежных апвеллингов Южного берега Крыма и их влияние на кислородный режим акватории // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 96–111. EDN VKPHBI.

Intensity of Coastal Upwellings of the Southern Coast of Crimea and their Impact on the Oxygen Regime of the Water Area

E. E. Sovga¹*, T. V. Khmara¹, I. V. Mezentseva²

¹ *Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

² *Sevastopol Branch of the Federal State Budgetary Institution
N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia*

* *e-mail: science-mhi@mail.ru*

Abstract

The paper analyses long-term data of the MHI Oceanological Data Bank for spring-summer seasons (May–September) of 1986–2000 and 2007–2023 and assesses the conditions of upwelling occurrence, their duration, influence on the change of temperature and oxygen regimes and content of nutrients in the water area of Goluboy and Yalta Bays. Fourteen upwellings were detected during the mentioned periods. The volume of analysed data was 3288 values of depth, temperature, sigma-t, oxygen content and nutrients. Upwellings recorded in the first period (1986–2000) were observed only in the Yalta Bay water area. They are characterised by large temperature variations, significant changes in sigma-t and for May upwellings by very high values of oxygen content. An analysis of the current MHI database from 2007 to 2023 allowed us to identify upwellings in the waters of Goluboy Bay, including the area of the stationary oceanographic platform, in July 2007, May 2010, 2012 and 2013, June and September 2013 and June 2021. We compared the temperature, coastal sigma-t and oxygen content for May and June 2012, 2013 and June 2021 and concluded that the intensity of upwellings had significantly decreased, the reasons for which are still unclear and may require further research. The paper considers differences in the content of biogenic nitrogen and phosphorus in the coastal water areas of the Southern Coast of Crimea during upwellings. These differences were manifested in the increase in the content of mineral forms of phosphorus and insignificant change in the content of mineral complexes of nitrogen. The analysis of the used database for these periods showed the insufficiency of target measurements and the need to adjust the monitoring system, especially in the spring–summer period, when the probability of upwelling is maximum.

Keywords: coastal upwelling, Southern Coast of Crimea, temperature regime, oxygen regime, nutrients

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: Sovga, E.E., Khmara, T.V. and Mezentseva, I.V., 2025. Intensity of Coastal Upwellings of the Southern Coast of Crimea and their Impact on the Oxygen Regime of the Water Area. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 96–111.

Введение

Район прибрежной зоны Южного берега Крыма (ЮБК) характеризуется значительной динамической активностью, о чем свидетельствуют многочисленные случаи проявления апвеллингов на поверхности моря. Апвеллинг возникает при вдольбереговом направлении ветра, отклоняющего, благодаря силе Кориолиса и вязкости, поверхностную воду от берега, вместо которой подтягиваются глубинные воды. Общепринятому критерию определения температурного апвеллинга соответствуют случаи с резким (более чем на 5 °С) уменьшением температуры поверхностных вод [1, 2]. Структура и динамика прибрежного апвеллинга у ЮБК описаны в работе [3], авторы которой рассматривают два вида прибрежного апвеллинга у ЮБК – экмановский ветровой и сгонный. Приведены характеристики условий их возникновения за 1980–1985 гг. и показано, что наиболее интенсивные и продолжительные экмановские апвеллинги образуются у пгт Кацивели (Голубой залив). В работе также рассматривается влияние апвеллингов на поднятие ядра холодного промежуточного слоя ближе к поверхности до горизонта 30 м.

Авторы работы [4] считают, что циркуляция прибрежного антициклонического вихря является одной из внутренних причин, создающих условия для развития апвеллинга у берегов Крыма даже при отсутствии или слабой вдольбереговой составляющей ветрового напряжения. Основные гидродинамические процессы в акватории ЮБК, способствующие возникновению апвеллингов, по мнению авторов [4], следующие:

- интенсивный западный и юго-западный поток Основного Черноморского течения (ОЧТ) вдоль южных берегов Крыма;
- взаимодействие северной периферии ОЧТ с неоднородностями рельефа шельфа (мысы, заливы) Крымского п-ова;
- вдольбереговые восточные и северо-восточные потоки северных периферий антициклонических динамических образований, реализующие при усилении вдольберегового ветра экмановский эффект;
- сгонные ветры западного и северного секторов, направленные по нормали к берегу.

Взаимодействие этих факторов определяет сложную структуру и динамику прибрежных вод, влияет на процесс формирования апвеллингов.

Результаты определения закономерностей развития прибрежных апвеллингов в Черном море с привлечением спутниковых данных представлены в работе [5]. Выполнено районирование акватории Черного моря по частоте возникновения прибрежных апвеллингов. Показано, что чаще апвеллинги наблюдаются в северо-западной части моря и гораздо реже в районе Ялты, Феодосии, Новороссийска и особенно у берегов Турции. Для этих районов характерно отсутствие апвеллингов в отдельные годы. Частота их появления составляет от 1 до 8 дней в месяц.

Выделение районов с наибольшей частотой проявления прибрежных апвеллингов в теплый период для Черного моря выполнено в работе [2].

Проанализирован ряд спутниковых изображений всей акватории Черного моря, полученных со сканеров *AVHRR* спутников *NOAA* с 1997 по 2011 г. Для ЮБК временной интервал наблюдений был продлен до 2015 г. Отмечена существенная межгодовая изменчивость общей длительности апвеллингов в рассматриваемый период. Для ЮБК приведены оценки взаимодействия апвеллинга с окружающими разномасштабными динамическими структурами, такими как область активного формирования антициклонических вихрей, под влиянием ОЧТ на юго-запад от ЮБК. В результате ширина развитого апвеллинга у ЮБК может достигать 30 км. По мнению авторов работы [2], апвеллинги являются своеобразными окнами, в которых воды термоклина и подтермоклина взаимодействуют с атмосферой в теплый период года.

Анализ внутригодовой и межгодовой изменчивости повторяемости, скорости и продолжительности западных ветров, способствующих возникновению апвеллингов у ЮБК, представлен в работе [6]. Использованы 6-часовые данные о компонентах скорости ветра на высоте 10 м, полученные из атмосферного реанализа *ERA5* за 1979–2021 гг., и данные контроля температуры на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института Российской академии наук.

Апвеллинг обнаруживается в виде понижений температуры вследствие подъема более холодных глубинных вод, чаще всего с апреля по октябрь, когда поверхностная температура выше температуры подповерхностных вод [7]. Наиболее контрастно это проявляется в летние месяцы, когда вертикальный градиент температуры в термоклине наибольший. Такой апвеллинг определяется по температуре поверхности моря, полученной по данным контактных измерений [1], в том числе термокос, установленных в шельфовых зонах [8–10], а также по спутниковым данным [2, 11, 12].

С применением современных методов математического моделирования (совместной мезомасштабной модели море – атмосфера *NOW (NEMO-OASIS-WRF)* с разрешением 2 км) в работе [13] изучен один из случаев ветрового прибрежного апвеллинга в Черном море у ЮБК 24–25 сентября 2013 г. Применение указанной модели позволило авторам [13] успешно воспроизвести резкое понижение температуры поверхности моря на 10 °С в течение двух суток, а повышенное пространственное разрешение при моделировании позволило выделить особенности апвеллинга, связанные с рельефом и очертаниями береговой линии.

В приведенных выше работах не оценивалось влияние апвеллинга на кислородный режим акватории, не анализировалось сопутствующее изменение содержания гидрохимических параметров, в частности таких компонентов экосистемы, как элементы главного биогенного цикла, содержание которых существенно влияет на продуктивность экосистем прибрежных зон морей [11, 14]. Подъем глубинных вод, насыщенных биогенными элементами, обеспечивает рост биомассы фитопланктона и других компонентов биосферы [15].

В работе [16] показано, что район Голубого залива представляет собой удобный полигон для выполнения синхронных дистанционных и подспутниковых исследований естественных океанологических процессов и влияния береговых антропогенных источников загрязнения на состояние морской прибрежной среды. Безусловным преимуществом этого полигона является расположение в его юго-западной части стационарной океанографической

платформы (СОП) – на расстоянии 430 м от берега у пгт Кацивели с глубиной моря в точке отбора проб 27 м. Это делает возможным оперативное наблюдение за развитием апвеллинга в районе ЮБК по изменению температуры поверхностных вод. В работе [11] изучен апвеллинг, возникший в мае 2010 г., с использованием не только контактных методов, но и по спутниковых данных. В работе [16] авторы обсуждают результаты экспедиционных исследований, проведенных на СОП отделом биогеохимии моря Морского гидрофизического института в 2009–2014 гг., и анализируют влияние апвеллингов в основном на содержание отдельных компонентов карбонатной системы, растворенного кислорода и элементов главного биогенного цикла. Показано, что мощный апвеллинг, наблюдавшийся в мае 2014 г. в районе СОП, не повлияв на содержание неорганических форм азота, привел к увеличению концентрации фосфатов в 3–4 раза по сравнению с фоновыми значениями.

В настоящем исследовании изучены условия возникновения апвеллингов в акватории Голубого (включая СОП у пгт Кацивели) и Ялтинского заливов, их продолжительность и влияние на изменение температурного и кислородного режимов и содержания биогенных элементов. Анализировали данные за май – сентябрь указанных периодов как сезон наиболее часто возникающих апвеллингов, легко регистрируемых за счет большой разницы температур поверхностного и глубинного слоев вод.

С учетом важности апвеллинга для оценки экологического состояния прибрежных акваторий дальнейшее изучение этого явления, особенно его сезонной динамики с подробной информацией о содержании кислорода и биогенных элементов, является особо актуальным.

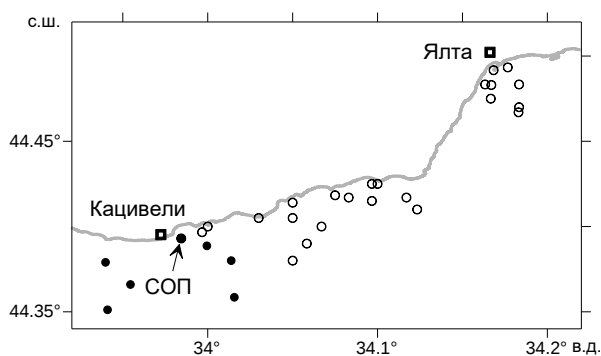
Цель работы – оценить интенсивность и продолжительность прибрежных апвеллингов, формирующихся в весенне-летний период в акваториях Голубого и Ялтинского заливов, на основе анализа изменений плотности вод, их температурного и кислородного режимов и содержания биогенных элементов.

Материалы и методы исследования

Проанализированы многолетние данные Банка океанологических данных (БОД) МГИ за 1986–2000 и 2007–2023 гг. с целью оценки условий возникновения апвеллингов в акватории Голубого (включая СОП у пгт Кацивели) и Ялтинского заливов. Оценивали интенсивность и продолжительность апвеллингов, а также их влияние на изменение температурного и кислородного режимов, плотности вод и содержания в них биогенных элементов (неорганического и общего фосфора и неорганического азота) за май – август. Анализируемые данные для выделенных апвеллингов периода 1986–2000 гг. (июль 1986 г., май 1987 и 1989 гг., июль 1997 г.) составили 2108 определений всех параметров вод, включая кислород и биогенные элементы. Определения распределены по годам неравномерно, а именно: в 1986 г. было сделано 580 определений, в 1987 г. – 575, в 1989 г. – 666, в 1997 г. – 287.

В 2007–2023 гг. апвеллинги были зарегистрированы в июле 2007 г., мае 2010, 2012 и 2013 гг., в июне и сентябре 2013 г., июне 2021 г. Анализируемые данные составили 1180 определений перечисленных выше параметров. Определения распределены по годам неравномерно, а именно: в 2007 г. – 384 определения всех анализируемых параметров, в 2010 г. – 224, в 2012 г. – 137, в 2013 г. – 323

и в 2021 г. – 112. В представленной базе данных был выявлен только один апвеллинг 7 сентября 2013 г. с максимальным перепадом температуры до 14 °С. В анализируемой БОД МГИ апвеллинги не зафиксированы за 2014 г. (данные только за июль и август), 2015 г. (данные за сентябрь), 2016 г. (за май и июль), 2017 г. (за июнь и сентябрь), 2018 г. (за июль), 2019 г. (за июль), 2020 г. (за сентябрь). В весенне-летний период 2022 и 2023 гг. (данные за май – сентябрь)



Р и с . 1 . Район исследования. Крестками обозначены станции, выполненные в 1986–2000 гг., точками – в 2007–2023 гг.

Fig. 1. Study area. The circles are stations performed in 1986–2000 and the dots are those performed in 2007–2023

в акватории Ялтинского и Голубого заливов апвеллинги также не выявлены. Это подтверждает заключение авторов работы [5], что прибрежные воды ЮБК относятся к той части Черного моря, где апвеллинги регистрируются не каждый год.

Схема расположения станций отбора проб представлена на рис. 1.

Следует отметить, что три из проанализированных апвеллингов отмечены в Ялтинском заливе (1986–1989 гг.), а 11 – в Голубом заливе (1997, 2007–2021 гг.).

Результаты и обсуждение

В прибрежной зоне ЮБК (лето 1986–2000 гг.) рассмотрены характеристики прибрежных вод в период прохождения апвеллингов в акватории Голубого (включая СОП у пгт Кацивели) и Ялтинского заливов. Продолжительность апвеллингов в указанный период изменялась от 6 до 28 ч со снижением температуры на 8–9 °С.

Наблюдавшийся 14 июля 1986 г. апвеллинг продолжительностью 6 ч сопровождался снижением температуры в поверхностном слое вод на 8.33 °С и увеличением содержания кислорода до 7.76 мл/л притом, что до апвеллинга это значение в поверхностном слое вод составляло 5.39 мл/л. В период апвеллинга отмечалось вертикальное увеличение плотности вод с 13.3 кг/м³ у поверхности до 14.1 кг/м³ на глубине 20 м, увеличение содержания кислорода соответственно от 7.76 до 8.12 мл/л, рост с глубиной содержания фосфатов и общего фосфора примерно в три раза при неизменном содержании неорганических форм азота (нитриты и нитраты).

Продолжительность апвеллинга в акватории Ялтинского залива 25 мая 1987 г. составила уже более суток (начало – 25 мая в 7:56 утра, конец – 26 мая в 11:00) при перепаде температуры 8 °С (15.60–7.60 °С). Апвеллинг сопровождался увеличением содержания кислорода в поверхностных водах до 8.65 мл/л (до апвеллинга 7.04 мл/л). Увеличилась и плотность вод с 12.30 до 14.30 кг/м³. Рост содержания фосфора и нитритного азота зафиксирован во вторые сутки апвеллинга на глубине 5 м. Следует отметить, что апвеллинг

в мае характеризовался также уменьшением содержания аммония по сравнению с предшествующим периодом.

Продолжительность апвеллинга 11 мая 1989 г. в акватории Ялтинского залива составила 6 ч с перепадом температуры больше 9 °С. Он также сопровождался увеличением плотности вод с 13.24 до 14.10 кг/м³ в период апвеллинга и ее снижением до 11.78 после его окончания. Следует отметить более высокое содержание кислорода (8.70–9.01 мл/л) в водах залива в период апвеллинга, которое сохранилось (8.63 мл/л) и после окончания апвеллинга 15 мая 1989 г. В период апвеллинга отмечено повышенное содержание общего фосфора на поверхностном горизонте, при этом содержание нитратов, фосфатов и нитритов на глубине не изменилось.

В акватории Голубого залива зафиксирован апвеллинг 22 июля 1997 г., продолжительность его составила 7 ч при снижении температуры более чем на 9 °С. Плотность вод до его начала составляла 10.47 кг/м³, а в период апвеллинга – 13.02–14.19 кг/м³. Концентрация растворенного кислорода в поверхностном слое 18 июля 1997 г. составила 5.86 мл/л, а уже в период апвеллинга изменялась от 7.27 до 6.11 мл/л. Содержание биогенных соединений (фосфатов, общего фосфора и нитритов) по вертикали не изменялось, в поверхностном слое вод повышенным было только содержание нитратов.

Таким образом, в первый исследуемый период апвеллинги вне зависимости от их продолжительности и величины перепада температуры всегда сопровождались увеличением содержания кислорода и плотности вод. В отношении биогенных элементов такого однозначного заключения сделать нельзя. Зафиксировано повышение содержания только общего фосфора и фосфатов во время трех апвеллингов в июле 1986 г., мае 1987 и 1989 гг. в акватории Ялтинского залива и 20 июля 2007 г. в акватории Голубого залива, где содержание фосфатов увеличилось почти в три раза, а общего фосфора – в полтора раза. Содержание неорганических форм азота в период апвеллингов с глубиной не менялось. Аналогичная ситуация описывается в работе [15], когда под влиянием мощного апвеллинга продолжительностью одни сутки в мае 2014 г. в районе СОП содержание неорганических форм азота не изменилось, а концентрация фосфатов увеличилась в 3–4 раза по сравнению с фоновыми значениями. Причиной могут быть различия в круговоротах этих биогенных элементов: для азота это система вода – атмосфера, а для фосфора вода – дно. В отличие от неорганических форм азота фосфор не имеет газообразных форм в воде, и общеизвестна его способность накапливаться у дна и возвращаться в водный столб в результате снижения содержания кислорода при восстановительных условиях. Эти различия особенно проявились и в других акваториях. Такие условия зафиксированы в Севастопольской бухте и описаны в работе [17]. Поскольку апвеллинг – это подъем глубинных вод, то увеличение содержания именно фосфора вполне объяснимо.

В 2007–2023 гг. в акватории Голубого залива апвеллинг был выявлен в июле 2007 г., мае 2010, 2012 и 2013 гг., июне и сентябре 2013 г., июне 2021 г. На СОП пробы отбирали на трех горизонтах: поверхностном, 0.5 и 5.0 м.

Продолжительность апвеллинга 20 июля 2007 г. составила одни сутки при снижении температуры примерно на 10 °С, повышении плотности вод от 9.96 кг/м³ (до начала апвеллинга) до 13.86 кг/м³ (в период его прохождения)

и увеличении концентрации растворенного кислорода с 5.5 до 7.96 мл/л на глубине 1 м. Апвеллинг сопровождался увеличением концентрации фосфатов почти в три раза (с 1.6 до 4.3 мкг/л) и общего фосфора в полтора раза (с 4.3 до 7.4 мкг/л) и почти не отразился на содержании нитритов и нитратов.

Зафиксированный в мае 2010 г. апвеллинг продолжительностью 24 ч сопровождался снижением температуры на 7.5 °С, увеличением плотности воды примерно на две единицы и незначительным (до 7.14 мл/л) увеличением содержания растворенного кислорода.

В мае 2012 г. наблюдалось несколько апвеллингов: 24 и 25 мая продолжительностью от 6 до 48 ч со снижением температуры на 9.4–10.4 °С, а также 30–31 мая продолжительностью сутки со снижением температуры более чем на 9 °С. Все три апвеллинга мая 2012 г. сопровождалось увеличением содержания кислорода в поверхностном слое вод до 7.36 мл/л при его содержании до апвеллинга на уровне 5.86 мл/л. В период всех трех апвеллингов плотность вод увеличивалась от 11.91 до 14.07 кг/м³ (таблица). Содержание биогенных элементов в период апвеллингов в мае 2012 г. не измеряли.

Параметры прибрежных апвеллингов в акватории Ялтинского и Голубого заливов, выявленных в 1986–2021 гг.

Parameters of coastal upwellings in Yalta and Goluboy Bays found in 1986–2021

Дата начала апвеллинга / Upwelling date	Продолжительность апвеллинга, ч / Upwelling duration, h	Пределы изменения / Range of		
		условной плотности, кг/м ³ / sigma-t, kg/m ³	температуры, °С / temperature, °C	содержания кислорода, мл/л / oxygen content, mL/L
14.07.1986	6	11.40–13.40	13.20–21.03	5.39–7.72
25.05.1987	28	12.30–14.30	7.60–15.60	7.04–8.65
11.05.1989	6	11.80–14.10	8.30–17.30	8.63–9.01
22.07.1997	7	10.50–13.23	11.70–22.20	5.89–7.27
20.07.2007	24	10.01–13.96	14.90–25.00	5.50–7.96
27.05.2010	24	11.83–13.47	11.46–18.95	6.68–7.14
24.05.2012	6	11.91–14.03	8.15–18.61	5.86–7.36
25.05.2012	48	12.50–14.03	8.60–17.80	6.74–7.22
30.05.2012	24	12.50–14.07	8.62–18.00	6.74–7.25
25.05.2013	30	12.10–13.89	10.00–18.58	6.54–6.90
28.05.2013	5	12.01–13.78	10.20–18.76	6.25–6.83
01.06.2013	2	11.50–13.46	12.00–20.00	5.95–7.15
07.09.2013	24	11.30–13.79	10.12–21.50	5.60–7.11
02.06.2021	13	12.62–13.60	11.19–17.54	6.30–6.72

Примечание: Пределы изменения плотности, температуры и содержания кислорода указаны для поверхностного горизонта.

Note: The ranges of density, temperature and oxygen content are given for the surface horizon.

Обзорная таблица всех обнаруженных в БОД МГИ прибрежных апвеллингов за два периода 1986–2000 гг. и 2007–2023 гг. позволяет сопоставить их влияние на изменение параметров водных масс, таких как плотность, температура и насыщение растворенным кислородом прибрежных акваторий ЮБК на примере Ялтинского и Голубого заливов. В таблице не представлены данные об изменении концентрации биогенных элементов в период апвеллингов, поскольку в БОД МГИ эти элементы были определены только в период апвеллингов в мае 1987 и 1989 гг., в июле 1986, 1997 и 2007 гг., в сентябре 2013 г. В другие периоды действия апвеллингов биогенные элементы не определяли.

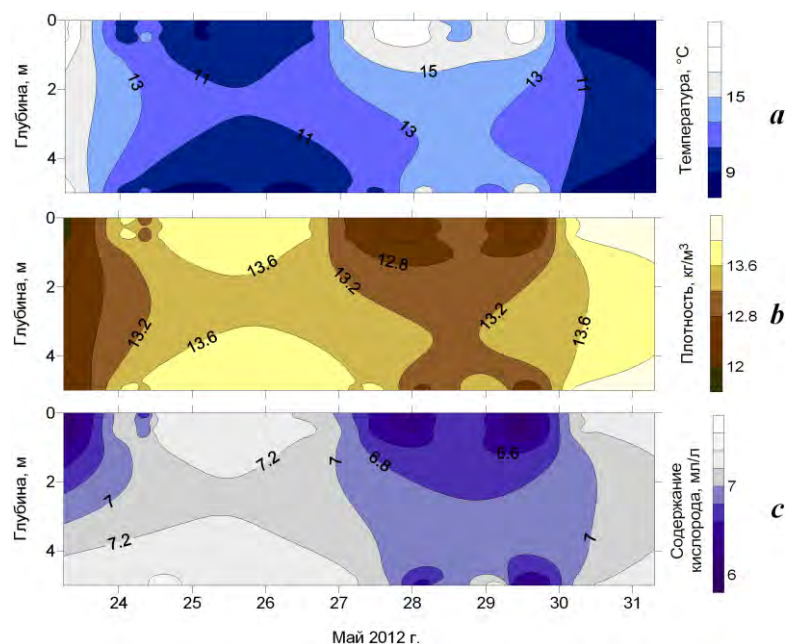
Из приведенных в таблице данных следует, что независимо от продолжительности действия апвеллинга изменение содержания кислорода зависит в основном от изменения плотности вод и перепада температуры в период апвеллинга. Во время выявленных апвеллингов снижение температуры в мае и июле составляло от 8 до 10.5 °C, в июне от 6.5 до 8 °C с максимальным значением 11.4 °C в сентябре 2013 г. Увеличение плотности вод в результате апвеллинга было максимальным (на 2.0–2.73 кг/м³) в июле 1997 и 2007 гг. и минимальным (на 1.33 кг/м³) в 2021 г. Максимальный рост содержания растворенного кислорода наблюдался в июле 1986 (2.33 мл/л) и 2007 гг. (2.46 мл/л), в мае 1987 и 2012 гг., июле 1997 г., июне и сентябре 2013 г. он составил 1.20–1.61 мл/л, а остальные апвеллинги характеризовались усилением аэрации не более чем на 0.58 мл/л.

Изменения параметров прибрежных вод (температура, плотность, содержание кислорода) под влиянием прибрежных апвеллингов в акватории Голубого залива в районе расположения СОП в современном периоде (2012–2021 гг.) представлены на рис. 2–5.

При сравнении информации, представленной на рис. 2, *a* и на рис. 2, *c*, видна четкая зависимость содержания кислорода от температуры вод: при апвеллинге пониженные температуры сопровождаются более высоким содержанием кислорода. Плотность вод (рис. 2, *b*) при апвеллинге незначительно возрастает, однако в отличие от температуры и содержания кислорода отмечаются отдельные линзы пониженных значений плотности на поверхностном и 5-метровом горизонте до значений 12.60 кг/м³. Позднее при апвеллинге по всей площади до 31 мая поле плотности почти однородное со значением 13.40 кг/м³. На рис. 2, *b* также показано, что расположение линз пониженной плотности соответствует области пониженных концентраций кислорода.

Апвеллинг продолжительностью 30 ч, зарегистрированный 25 и 26 мая 2013 г., отличался от апвеллингов в мае 2012 г. снижением температуры примерно на 8 °C и меньшим перепадом условной плотности с 12.10 до 13.80 кг/м³, что отразилось и на незначительном (6.54–6.86 мл/л) изменении содержания кислорода в поверхностном слое вод (рис. 3).

Апвеллинг, зафиксированный 28 мая 2013 г., характеризовался продолжительностью 5 ч, снижением температуры на 8.5 °C и сопоставимыми изменениями условной плотности и содержания растворенного кислорода (см. таблицу). Очень непродолжительный (2 ч) апвеллинг имел место 1 июня 2013 г. (рис. 3) со снижением температуры примерно на 8 °C. Он сопровождался снижением содержания кислорода от 7.15 мл/л в период апвеллинга до 5.95 мл/л



Р и с . 2 . Параметры прибрежных вод: температура (а), плотность (b), содержание кислорода (с) – при прохождении апвеллингов с 24 по 30 мая 2012 г. в акватории Голубого залива (СОП)

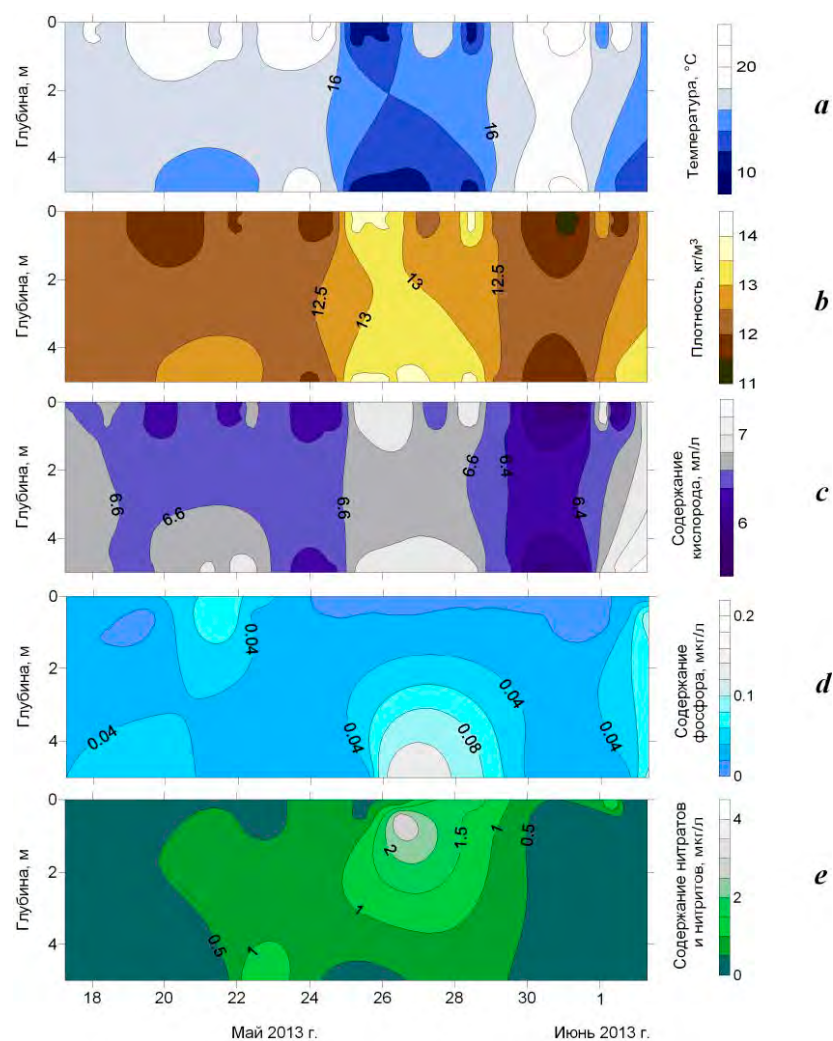
Fig. 2. Parameters of coastal waters: temperature (a), sigma-t (b) and oxygen content (c) during upwellings from 24 to 30 May 2012 in the Goluboy Bay water area (stationary oceanographic platform – SOP)

после его окончания. Плотность на поверхностном горизонте в период апвеллинга выросла до 13.46 кг/м^3 и снизилась после его окончания до 11.50 кг/м^3 .

При сравнении данных, представленных на рис. 2 и 3, можно отметить, что в мае 2013 г. наблюдаемые апвеллинги характеризовались меньшим перепадом температуры, изменением плотности и содержания кислорода, чем в мае 2012 г.

7 сентября 2013 г. в акватории Голубого залива был зафиксирован апвеллинг продолжительностью 24 ч с перепадом температуры больше 10°C (с 21.5 до 10.12°C), повышением плотности от 11.34 до 13.79 кг/м^3 и с последующим снижением после апвеллинга до 5.6 мл/л при росте содержания растворенного кислорода до 7.11 мл/л (рис. 4). Кроме того, вдвое увеличилось содержание фосфатов, как при апвеллинге в июле 2007 г. Это также отмечено в результатах работы [15], где описан апвеллинг мая 2014 г.

Более высокая интенсивность апвеллинга 7 сентября 2013 г., по сравнению с маем и июнем этого же года, может быть связана с действием такого климатического фактора, как ветер. В работе [6], в которой изучалась продолжительность действия ветров, благоприятных для возникновения апвеллинга,



Р и с. 3. Параметры прибрежных вод: температура (а), плотность (b), содержание кислорода (с), биогенные фосфор (d) и сумма нитритов и нитратов (е) при прохождении апвеллингов с 26 по 30 мая 2013 г. и 1 июня 2013 г. в акватории Голубого залива (СОП)

Fig. 3. Parameters of coastal waters: temperature (a), sigma-t (b), oxygen content (c), biogenic phosphorus (d) and sum of nitrites and nitrates (e) during upwellings from 26 to 30 May 2013 and 1 June 2013 in the Goluboy Bay water area (SOP)

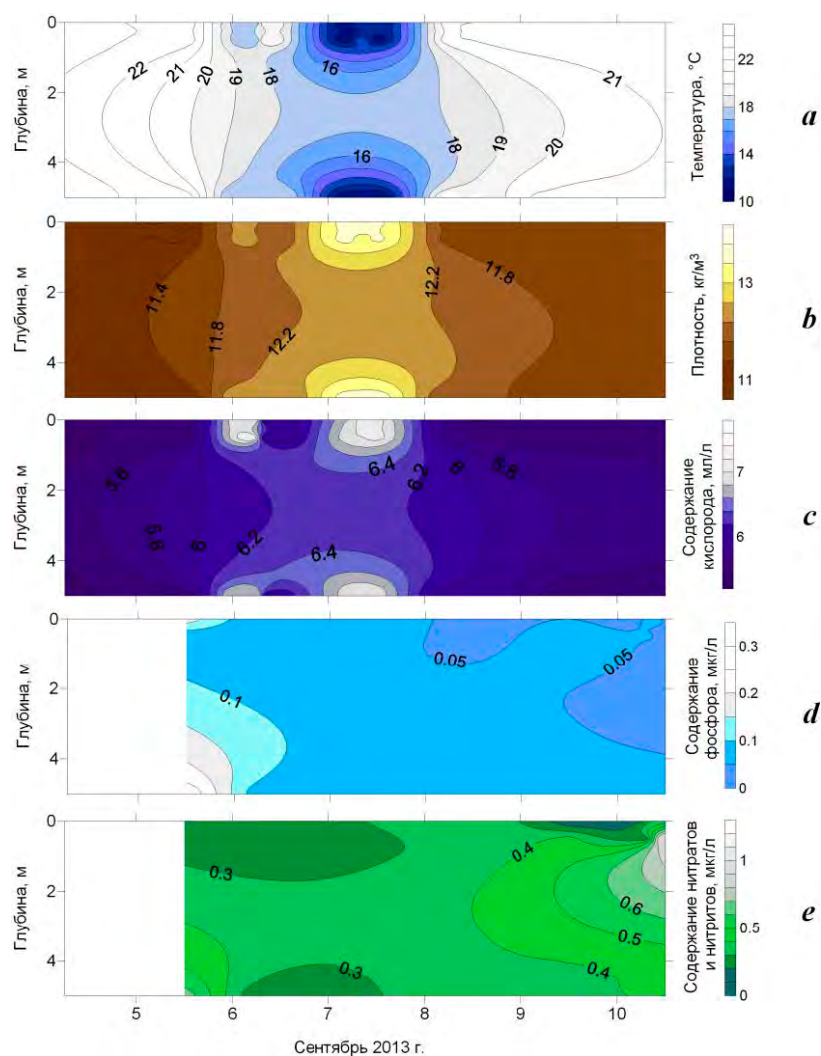
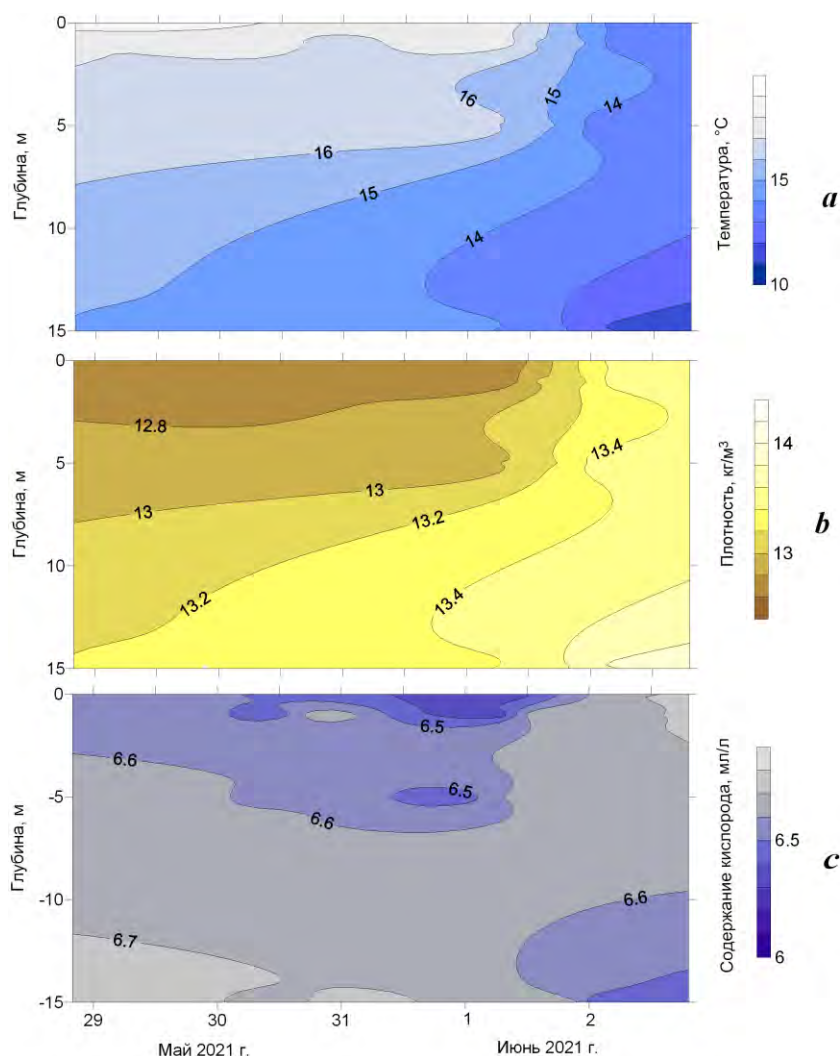


Рис. 4. Параметры прибрежных вод: температура (a), плотность (b), содержание кислорода (c), биогенные фосфор (d) и сумма нитритов и нитратов (e) при прохождении апвеллинга 7 сентября 2013 г. в акватории Голубого залива (СОП)

Fig. 4. Parameters of coastal waters: temperature (a), sigma-t (b), oxygen content (c), biogenic phosphorus (d) and sum of nitrites and nitrates (e) during an upwelling on 7 September 2013 in the Goluboy Bay water area (SOP)



Р и с . 5 . Параметры прибрежных вод: температура (*a*), плотность (*b*), содержание кислорода (*c*) – при прохождении апвеллинга 2 июня 2021 г.

Fig. 5. Parameters of coastal waters: temperature (*a*), sigma-t (*b*) and oxygen content (*c*) during an upwelling on 2 June 2021

показано, что наибольшая продолжительность (от 6 ч до нескольких суток) ветров западных направлений была зафиксирована с 29 августа по 8 сентября 2013 г.

Продолжительность апвеллинга 2 июня 2021 г. составила около 13 ч (рис. 5).

Из рис. 5 следует, что апвеллинг июня 2021 г. можно охарактеризовать минимальными значениями перепада температуры (примерно на 6.5 °C), минимальным изменением плотности (на 1.33 кг/м³) и самым незначительным изменением содержания кислорода (на 0.16–0.42 мл/л).

Анализ информации, представленной на рис. 2–5, позволяет сделать заключение, что во время апвеллинга 2 июня 2021 г. снижение температуры было наименьшим начиная с 2012 г. Возможно, поэтому распределение содержания кислорода на всех горизонтах (6.56–6.72 мл/л) было довольно равномерным, а изменение плотности было незначительным (с 12.62 до 13.52 кг/м³).

Анализ сезонной динамики возникновения апвеллингов в прибрежных акваториях ЮБК, согласно данным БОД МГИ, показал, что восемь апвеллингов были отмечены в мае, три – в июле, два – в июне и только один – в сентябре.

Причины обнаруженного нами незначительного снижения интенсивности апвеллингов в весенне-летний период с 2012 по 2021 г. пока неясны, поскольку в сентябре 2013 г. отмечен более интенсивный апвеллинг. С учетом сложности процессов, которые протекают в прибрежных акваториях ЮБК, находящихся под влиянием факторов различной природы, только дальнейшие наблюдения и усовершенствование системы мониторинга позволят получить ответы на возникшие вопросы.

Заключение

На основании анализа натуральных материалов БОД МГИ за два периода 1986–2000 и 2007–2023 гг. получены оценки влияния прибрежных апвеллингов на изменение температурного и кислородного режимов и содержания биогенных элементов в акватории Голубого залива, включая СОП в пгт Кацивели, и в акватории Ялтинского залива. Получено подтверждение максимальной частоты возникновения апвеллингов в весенне-летний сезон.

Показано, что апвеллинг, как фактор изменения аэрации вод, при любой продолжительности его действия способствует увеличению содержания растворенного кислорода в результате сопутствующего перепада температуры и изменения плотности вод.

Апвеллинги, зафиксированные в первый период, отмечены в акватории Ялтинского залива (три апвеллинга) и Голубого залива (один апвеллинг). Для них характерны большие перепады температур, существенные изменения плотности воды, а для майских апвеллингов – очень высокое содержание кислорода как до возникновения апвеллинга, так и после него. Причины такой изменчивости параметров выявленных апвеллингов пока неясны.

Анализ данных за второй период (2007–2023 гг.) показал, что сформировавшиеся апвеллинги обнаружены в акватории Голубого залива, включая акваторию расположения СОП. Сравнительный анализ информации об интенсивности апвеллингов за май и июнь 2012, 2013 гг. и июнь 2021 г. позволил выявить по изменению параметров прибрежных вод (температуры, плотности и содержания кислорода) существенное снижение интенсивности апвеллингов, причины которого пока неясны и могут стать предметом дальнейших исследований.

Сделан вывод, что подъем глубинных вод в результате апвеллинга способствует увеличению содержания минеральных форм фосфора и незначительно влияет на концентрацию минеральных комплексов азота. Предположение, что различие в изменении содержания указанных биогенных комплексов под действием прибрежного апвеллинга связано с различиями в системах их круговорота, требует дальнейших исследований.

Анализ используемой базы данных в указанные периоды показал недостаточность целевых измерений и необходимость корректировки системы мониторинга, особенно в весенне-летний период, когда максимальна вероятность возникновения апвеллингов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ловенкова Е. А., Полонский А. Б. Климатические характеристики апвеллинга у побережья Крыма и их изменчивость // Метеорология и гидрология. 2005. № 5. С. 44–52. EDN KUHLCT.
2. Станичная Р. Р., Станичный С. В. Апвеллинги Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 4. С. 195–207. EDN BNEFXX. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207>
3. Иванов В. А., Михайлова Э. Н. Апвеллинг в Черном море. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 91 с.
4. Репетин Л. Н., Романов А. С., Чурилова Т. Я. Апвеллинг в зоне антициклонической завихренности на шельфе Южного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2010. Вып. 22. С. 205–227. EDN WTBIAT.
5. Прибрежный черноморский апвеллинг и межгодовая изменчивость его интенсивности / Р. В. Боровская [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2005. Вып. 12. С. 42–48. EDN YUCFPP.
6. Ветровые условия возникновения апвеллингов в районе Южного берега Крыма / И. Г. Шокурова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 4. С. 435–447. EDN HWSWUX.
7. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
8. Толстошеев А. П., Мотыжев С. В., Лунев Е. Г. Результаты долговременного мониторинга вертикальной термической структуры шельфовых вод на Черноморском гидрофизическом полигоне РАН // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 75–87. EDN JOHOWF. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-75-87>
9. Сильвестрова К. П., Зацепин А. Г., Мысленков С. А. Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 521–530. EDN ZCRXWF. <https://doi.org/10.7868/S0030157417040013>
10. Примеры подходов к исследованию температурной изменчивости вод шельфа Черного моря при помощи кластера термокос / В. В. Очеретник [и др.] // Океанология. 2020. Т. 60, № 2. С. 173–185. EDN YCLUGL. <https://doi.org/10.31857/S0030157420010189>
11. 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)
12. Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе данных спутникового мониторинга / Р. В. Боровская [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2008. № 2. С. 26–36. EDN IUUSQN.
13. Ефимов В. В., Яровая Д. А., Барабанов В. С. Численное моделирование апвеллинга у Южного берега Крыма 24–25 сентября 2013 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 6–19. EDN SSUZXG.

14. Plankton response to weakening of the Iberian coastal upwelling / F. F. Pérez [et al.] // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16, iss. 4. P. 1258–1267. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02125.x>
15. Chavez F. P., Messié M. A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems // *Progress in Oceanography*. 2009. Vol. 83, iss. 1–4. P. 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>
16. Голубой залив как подспутниковый полигон для оценки гидрохимических характеристик в шельфовых областях Крыма / С. И. Кондратьев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 49–61. EDN VTPCZR. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-1-49-61>
17. Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В. Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценок самоочистительной способности ее экосистем // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 2. С. 110–123. EDN AWWRHN. <https://doi.org/10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt>

Поступила 18.06.2024 г.; одобрена после рецензирования 03.09.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Совга Елена Евгеньевна, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0670-4573**, **SPIN-код: 8675-2443**, **ResearcherID: A-9774-2018**, science-mhi@mail.ru

Хмара Татьяна Викторовна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 6506060413**, **SPIN-код: 3382-0644**, **ResearcherID: C-2358-2016**, xmara@mhi-ras.ru

Мезенцева Ирина Владимировна, старший научный сотрудник, Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Советская, д. 61), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9771-0380**, **SPIN-код: 2352-8939**, mez-irina@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Совга Елена Евгеньевна – постановка задачи, анализ базы данных, обсуждение результатов, написание и редактирование статьи

Хмара Татьяна Викторовна – подготовка графического материала, обсуждение результатов, редактирование статьи

Мезенцева Ирина Владимировна – предоставление и анализ базы данных по Ялтинскому заливу, обсуждение результатов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.