

## Локальная сезонная гипоксия и образование сероводорода в придонных водах Севастопольской бухты в 2009–2019 годах

С. И. Кондратьев\*, А. В. Видничук

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*e-mail: skondratt@mail.ru*

Поступила: 26.03.2020 г.; принята к публикации 08.05.2020 г.; опубликована 25.06.2020 г.

Целью данной работы является выявление причин возникновения гипоксических условий в одном из районов Севастопольской бухты. В статье использованы результаты ежеквартального экологического мониторинга Севастопольской бухты отделом биогеохимии моря Морского гидрофизического института. В ходе мониторинга по сетке из 36 станций с поверхностного и придонного горизонтов с помощью батометров отбирались пробы на растворенный кислород, элементы карбонатной системы и главного биогенного цикла. Для получения вертикальных профилей температуры, солености и кислорода использовался CTD-зонд ГАП-16, снабженный датчиком кислорода. При выполнении экологического мониторинга летом 2009 г. в придонных водах станции 8 был обнаружен сероводород с концентрацией 37 мкМ. Анализ содержания кислорода за последние 10 лет показал регулярное возникновение гипоксических условий (содержание кислорода менее 62.5 мкМ) в придонных водах этой станции. Возникновение гипоксических условий в придонных водах в районе станции 8 связано с искусственным углублением дна в районе этой станции, сделанным для погружения плавучего дока. Прогревание поверхностных вод в мае – июне приводит к возникновению термоклина, постепенно опускающегося на глубину 10–12 м. При дальнейшем прогреве разница в температуре вод может достигать 8 °С. Возникший термоклин совместно со слоем менее соленых вод на горизонте 10–14 м (происхождение этого слоя не совсем понятно) ослабляют вертикальный обмен, при этом начинается потребление растворенного кислорода в процессе минерализации взвешенного органического вещества. В сентябре 2009 и 2014 гг. этот процесс завершился образованием сероводорода.

**Ключевые слова:** Севастопольская бухта, гипоксия придонных вод, образование сероводорода, биогенные элементы, антропогенные факторы.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственных заданий по темам 0827-2019-0003 и 0827-2019-0004, и проектов РФФИ № 18-45-920018 «Исследование и оценка влияния антропогенных и природных факторов на кислородный режим Севастопольской бухты по результатам многолетнего экспедиционного мониторинга и численного моделирования» и № 18-05-80028 «Исследование и оценка роли гидрофизических и биогеохимических процессов в формировании зон

© Кондратьев С. И., Видничук А. В., 2020



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

дефицита кислорода и сероводородного заражения прибрежных районов Крымского полуострова и Керченского пролива».

**Для цитирования:** Кондратьев С. И., Видничук А. В. Локальная сезонная гипоксия и образование сероводорода в придонных водах Севастопольской бухты в 2009–2019 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 107-212. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-107-121

## **Local Seasonal Hypoxia and Hydrogen Sulphide Formation in the Bottom Waters of the Sevastopol Bay in 2009–2019**

**S. I. Kondratev\*, A. V. Vidnichuk**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

*\*e-mail: skondratt@mail.ru*

Submitted 26.03.2020; revised 08.05.2020; published 25.06.2020

The purpose of this work is to identify the causes of hypoxia conditions in one of the Sevastopol Bay areas. The article used the results of a quarterly environmental monitoring of the Sevastopol Bay performed by the Marine Biogeochemistry Department of the Marine Hydrophysical Institute. During the monitoring samples of dissolved oxygen, elements of the carbonate system and main biogenic cycle were taken from 36 stations at surface and bottom horizons. The GAP-16 STD-probe equipped with an oxygen sensor was used to obtain vertical temperature, salinity and oxygen profiles. During environmental monitoring in summer of 2009, hydrogen sulfide at a concentration of 37  $\mu\text{M}$  was detected in the bottom waters of Station 8. Analysis of oxygen content over the past 10 years showed a regular occurrence of hypoxia conditions (oxygen content less than 62.5  $\mu\text{M}$ ) in the bottom waters of this station. This is due to artificial deepening of the bottom in the area of this station made for immersion of a floating dock. Warming of the surface water in May – June leads to emergence of a thermocline, which gradually descends 10–12 m deep. The difference in water temperatures can reach 8 °C. The resulting thermocline, together with a layer of less salty water at the horizon of 10–14 m (the origin of this layer is not quite clear) weaken the vertical exchange, thus extraction of dissolved oxygen begins for the process of mineralization of particulate organic matter. This process ended with formation of hydrogen sulfide in September 2009 and 2014.

**Keywords:** Sevastopol Bay, bottom water hypoxia, hydrogen sulfide formation, biogenic elements, anthropogenic factors.

**Acknowledgements:** the research is performed under state order on topics No. 0827-2019-0003 “Oceanological processes” and 0827-2019-0004 “Coastal studies” and supported by the Russian Foundation for Basic Research as part of scientific projects No. 18-45-920018 “Studies and evaluation of anthropogenic and natural influences on the distribution of oxygen in the Sevastopol Bay based on monitoring data and numerical simulations” and No. 18-05-80028 “Studies and assessment of the role of water dynamics and biogeochemical processes in development of oxygen deficit and sulfidic conditions in coastal areas of Crimea and the Kerch Strait”.

**For citation:** Kondratev, S.I. and Vidnichuk, A.V., 2020. Local Seasonal Hypoxia and Hydrogen Sulphide Formation in the Bottom Waters of the Sevastopol Bay in 2009–2019. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 107–121. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-107-121 (in Russian).

## **Введение**

Севастопольская бухта является полузамкнутой морской акваторией, подверженной постоянному антропогенному воздействию. Основные факторы, негативно сказывающиеся на состоянии экосистемы бухты, – это регулирование стока р. Черной, ограничение водообмена из-за постройки мола, эвтрофикация, наступившая вследствие сброса речных, ливневых и сточных вод [1]. Это приводит к неблагоприятным изменениям условий жизни, количественного состава и видового разнообразия гидробионтов, а также к изменениям гидродинамических и гидрологических характеристик, трансформации гидрохимической структуры вод и донных осадков. В результате происходит разрушение и уничтожение ресурсного потенциала бухты.

В 1998–2005 гг. исследовательскими группами Морского гидрофизического института (МГИ) и Института биологии южных морей были начаты длительные и детальные междисциплинарные исследования Севастопольской бухты. По результатам этих работ количество станций на акватории было увеличено с 7 до 32, а ряд публикаций [2–8] по экологическому состоянию бухты завершился в 2006 г. крупным исследованием [1].

Натурные работы на акватории бухты на этом не закончились. Начиная с 2006 г. сетка была расширена до 36 станций, гидрохимический мониторинг проводился ежеквартально, при этом он сопровождался одновременной съемкой нижнего течения р. Черной, сток которой оказывает значительное влияние на экологическое состояние Севастопольской бухты [9]. Кроме анализа состояния вод бухты стали проводиться исследования поверхностного слоя (0–5 см) донных осадков, показавшие наличие сероводорода в верхнем слое поровых вод [10, 11].

По данным почти 20-летнего мониторинга Севастопольской бухты, распределение основных гидрохимических параметров в ее водах характеризуется значительной изменчивостью как пространственных, так и сезонных колебаний. Исследования также показали, что гидрологический режим бухты является важнейшим фактором формирования экосистемы полузакрытой акватории, подверженной антропогенному воздействию [1]. В данной работе обсуждаются особенности кислородного режима бухты. Он был рассмотрен в ряде работ [12, 13], но без учета важной особенности рельефа дна, которая может оказать крайне неблагоприятное влияние на экологическое состояние вод бухты. Так, при выполнении летней съемки Севастопольской бухты в 2009 г. в придонных водах ст. 8 был обнаружен сероводород с концентрацией 37 мкМ. Анализ содержания кислорода в придонных водах ст. 8 за последние 10 лет показал регулярное возникновение здесь гипоксических условий (содержание кислорода менее 62.5 мкМ [14]). В данной работе рассматриваются причины возникновения гипоксических условий в одном из районов Севастопольской бухты и возможное воздействие этого опасного явления на экологическое состояние.

## **Материалы и методы**

В работе использованы результаты ежеквартального экологического мониторинга Севастопольской бухты, который выполняется отделом биогеохимии моря МГИ. Начиная с 2006 г. проведено 36 экспедиций (съемки планировались в каждом из четырех гидрологических сезонов, но не всегда

осуществлялись), в которых с помощью батометров с поверхностного и придонного горизонтов отбирались пробы на содержание кислорода, pH, общей щелочности и элементов главного биогенного цикла. Для получения вертикальных профилей температуры и солености использовался CTD-зонд ГАП-12, для подробных (каждые 0.5 м) вертикальных профилей кислорода – датчик, изготовленный в МГИ. Летом 2019 г. он был заменен датчиком кислорода *SBE 43*. Корректировка показаний датчиков для каждого зондирования производилась на основании результатов, полученных методом Винклера.

После обнаружения в сентябре 2009 г. сероводорода в придонных водах ст. 8 на глубине 20 м (в 2006–2008 гг. ст. 8 располагалась примерно в 100 м к юго-востоку, и глубина места на ней была меньше) летнюю съемку бухты стали проводить в начале сентября, когда разница температур воды на поверхности и у дна должна быть максимальной.

Минеральные формы биогенных элементов (фосфаты, кремний, нитратный и нитритный азот) анализировали фотометрически после фильтрации проб морской воды через мембранный фильтр с размером пор 0.45 мкм [15]. При определении концентрации кремния вносилась поправка на соленость. Аммонийный азот определяли с помощью модифицированного метода Сэджи – Солорзано для морской воды, в основе которого лежит фенол-гипохлоритная реакция с использованием нитропруссид натрия и цитрата натрия [16].

Средние вертикальные профили температуры, солености и содержания кислорода в водах бухты были построены с помощью программы «Гидролог» [17].

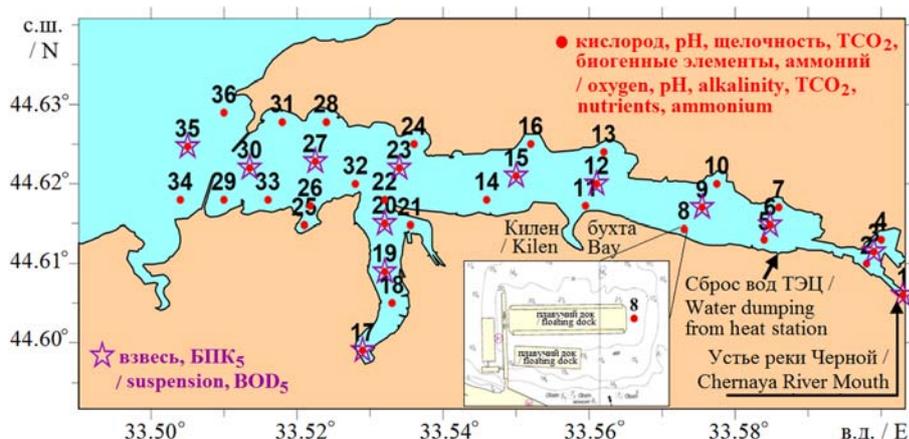
### **Результаты и обсуждение**

Схема дрейфовых станций, объем выполняемых в Севастопольской бухте экспедиционных работ и особенности рельефа дна на ст. 8 представлены на рис. 1. Такое расположение станций позволяет оценивать влияние на гидрохимический состав вод береговых источников различного вида, от ливневых стоков до природных родников.

Важнейшей особенностью рельефа дна бухты, изучению которой за все 20 лет мониторинга не придавали особого значения, оказалось искусственное углубление дна в районе ст. 8 под плавучим доком, расположенным у южного берега Севастопольской бухты восточнее Килен-бухты. Это углубление первоначально не отображалось на картах, и только на карте Севастопольской бухты, изданной в 2003 г. (документ стал доступен гораздо позже), глубины в этом районе были обозначены: 20–21 м на ст. 8 и 10–11 м вокруг нее<sup>1)</sup>. Эмпирически существование «ям» под доком было подтверждено экспедицией МГИ в сентябре 2009 г., когда вследствие погодных условий пробы придонной воды были отобраны в непосредственной близости от дока.

Такой рельеф дна в теплый период года должен способствовать возникновению придонной гипоксии, а иногда и образованию сероводорода, как это происходит, например, в Днепро-Бугском лимане, где в июле – августе на глубине 15–16 м сероводород неоднократно фиксировался в углублениях дна [18, 19].

<sup>1)</sup> Східна частина Севастопольської бухти / Разраб. «Укрморкартографія». 1:5000. Київ, 2013. МНК 3704.



Р и с . 1. Схема гидролого-гидрохимических станций на акватории Севастопольской бухты и рельеф дна в районе ст. 8 <sup>1)</sup>

F i g . 1. Map of hydrological and hydrochemical stations in the waters of Sevastopol Bay and bottom configuration at St. 8 <sup>1)</sup>

Действительно, в сентябре 2009 г. в придонных водах ст. 8 сначала было обнаружено отсутствие кислорода, а затем был зафиксирован сероводород с концентрацией 37 мкМ. Анализ данных летних съемок за последние 10 лет показал регулярное возникновение гипоксических условий у дна (табл. 1, значения содержания кислорода менее 60 мкМ и насыщения менее 30 % выделены жирным шрифтом).

Возникновение гипоксии в придонных водах мелководных областей происходит, как правило, в теплое время года, когда вследствие прогрева поверхностных вод возникает плотностная стратификация, препятствующая вертикальному обмену и поступлению кислорода в придонные воды. Существование плотностной (температурной) стратификации на ст. 8 в летнее время подтверждается различием в температуре придонных вод на соседних станциях 8 и 9, на которых глубина места была 18–20 м и 11–12 м соответственно.

Возникновению гипоксии также благоприятствует обилие в придонных водах осевшего взвешенного органического вещества (ВОВ), при минерализации которого расходуется растворенный кислород. Поступление ВОВ в район ст. 8 обеспечивается стоком р. Черной.

С пресноводным стоком р. Черной в Севастопольскую бухту поступает значительное количество элементов главного биогенного цикла [20, 21], что обеспечивает в районах Инкерманской бухты (ст. 2–4) и Нефтегавани (ст. 5–7) обильную кормовую базу для фитопланктона в течение всего года. Образующееся в процессе развития и отмирания фитопланктона ВОВ перемещается течением на запад и постепенно оседает на дно. При этом 10-метровое углубление на пути перемещения ВОВ должно быть ловушкой для сбора части постоянно образующегося в этих районах ВОВ.

Сброс в районе Нефтегавани (отмечен на рис. 1 стрелкой) вод, нагреваемых в процессе охлаждения Севастопольской ТЭЦ, постоянно повышает температуру поверхностных вод в этом месте (в зимний период хорошо видно, как над сбрасываемыми ТЭЦ теплыми водами поднимается пар),

Т а б л и ц а 1. Температура, содержание и насыщение придонных вод кислородом в районе соседних станций 8 (глубина 20 м после сентября 2009 г.) и 9 (глубина 12 м)

T a b l e 1. Temperature, oxygen content and bottom water saturation at St. 8 (depth 20 m after September 2009) and neighboring St. 9 (depth 12 m)

Дата съемки / Survey date	Температура, °С / Temperature, °С		Содержание O <sub>2</sub> , мкМ / O <sub>2</sub> content, μM		O <sub>2</sub> , %	
	Ст. 8 / St. 8	Ст. 9 / St. 9	Ст. 8 / St. 8	Ст. 9 / St. 9	Ст. 8 / St. 8	Ст. 9 / St. 9
Октябрь / Oct. 2006	20.5*	20.4	214	201	85	79
Июнь / June 2007	17.3**	22.0	147	175	55	71
Октябрь / Oct. 2008	16.2***	17.0	105	232	39	86
Сентябрь / Sept. 2009	17.9	21.1	<b>0</b>	226	<b>0</b>	91
Сентябрь / Sept. 2011	15.6	21.2	100	228	36	91
Сентябрь / Sept. 2012	17.5	21.0	96.5	212	36	85
Октябрь / Oct. 2013	12.9	15.0	132	259	45	92
Сентябрь / Sept. 2014	21.4	24.1	<b>14.3</b>	196	<b>6</b>	83
Сентябрь / Sept. 2015	20.1	23.8	<b>31.7</b>	201	<b>13</b>	84
Сентябрь / Sept. 2016	19.4	24.3	<b>45.6</b>	209	<b>18</b>	88
Сентябрь / Sept. 2017	17.4	22.9	142	251	53	104
Август / Aug. 2018	16.5	24.6	<b>56.7</b>	208	<b>21</b>	89
Август / Aug. 2019	15.4	23.3	178	235	40	52

\* Глубина 13 м / Depth 13 m.

\*\* Глубина 14.5 м / Depth 14.5 m.

\*\*\* Глубина 18.5 м / Depth 18.5 m.

что в свою очередь способствует интенсификации процесса фотосинтеза и образования ВОВ.

Таким образом, в поверхностных водах прилегающей к ст. 8 акватории в течение всего года наблюдаются благоприятные условия для образования ВОВ, которое частично оседает на дно в углублении под станцией и в процессе минерализации начинает потреблять из придонных вод кислород, выделяя минеральные формы биогенных элементов.

Анализ вертикальных профилей температуры, солености, содержания и насыщения вод кислородом (рис. 2) позволяет предположить следующую картину возникновения гипоксических условий в районе ст. 8. В мае – июне поверхностные воды начинают прогреваться, и возникает термоклин, постепенно опускающийся на глубину 10–12 м. При дальнейшем прогреве разница в температуре вод на глубине 12 и 20 м (ст. 8) может достигать 8 °С (табл. 1).

Вертикальный обмен замедляется, придонное течение слабое, а высота волны в этом районе редко превышает 30 см. В условиях ограниченного водообмена происходит потребление растворенного кислорода в процессе минерализации и кислородный профиль (ст. 8) все более отличается от среднего по бухте (использовать датчик кислорода для построения профилей удавалось очень редко, поэтому данные на рис. 2 приведены со значительным

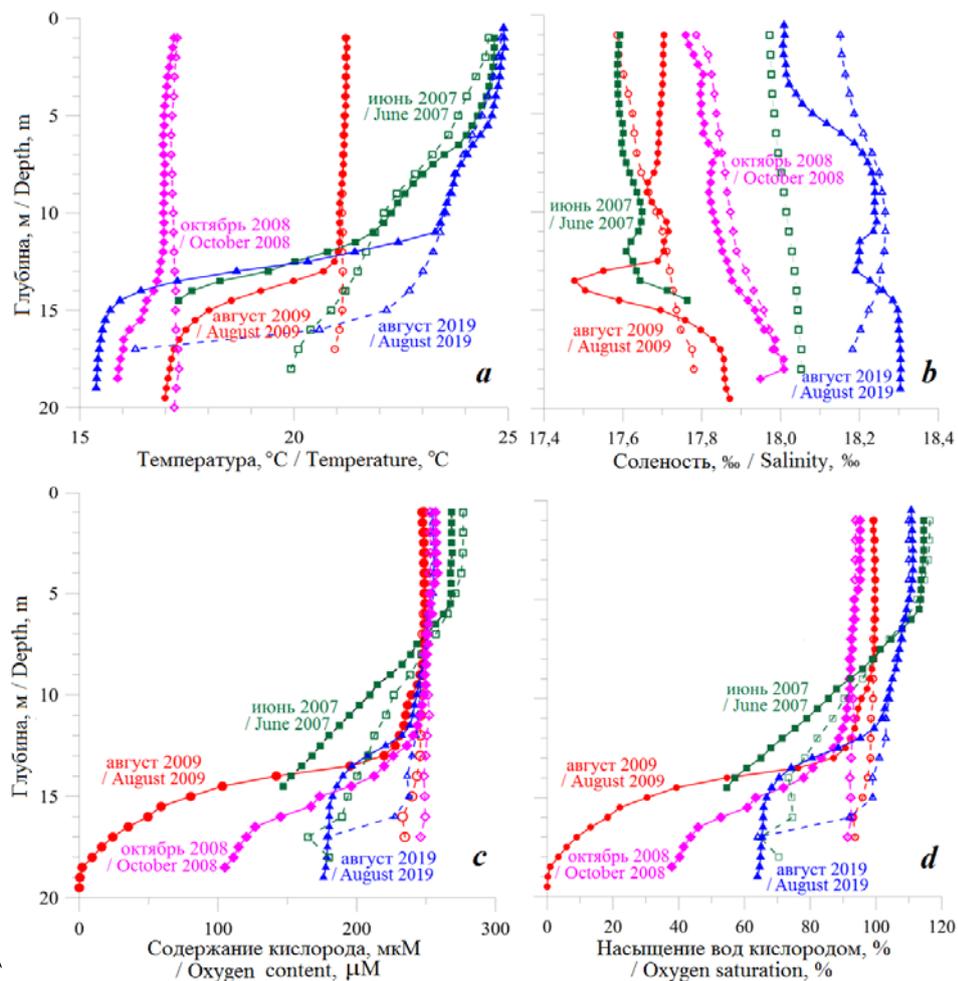


Рис. 2. Вертикальные профили температуры (а), солености (b), содержания растворенного кислорода (с) и насыщения вод кислородом (d) для четырех съемок (сплошная линия – для ст. 8, штриховая – средний профиль для бухты)

Fig. 2. Vertical profiles of temperature (a), salinity (b), dissolved oxygen (c) and oxygen saturation (d) for four expeditions (solid line is for Station 8, dashed line is for the averaged profile for the bay for this expedition).

временным интервалом). Иногда этот процесс завершался образованием сероводорода, как это было в сентябре 2009 и 2014 гг. (в последнем случае присутствие сероводорода в придонной воде зафиксировано органолептически).

Важной особенностью вертикальных профилей солености в районе ст. 8 является периодически возникающий на глубинах 12–15 м слой вод меньшей солености толщиной около 4 м (рис. 2, b). Разность в солености выше и ниже лежащих вод отмечалась для трех из четырех приведенных летних съемок и составляла 0.1–0.3 ‰, при максимальной разнице в августе 2009 г. был зафиксирован сероводород в придонных водах. В результате анализа всех полученных вертикальных профилей солености в районе ст. 8 обнаружилось, что на глубинах 12–16 м возникал слой не только пониженной

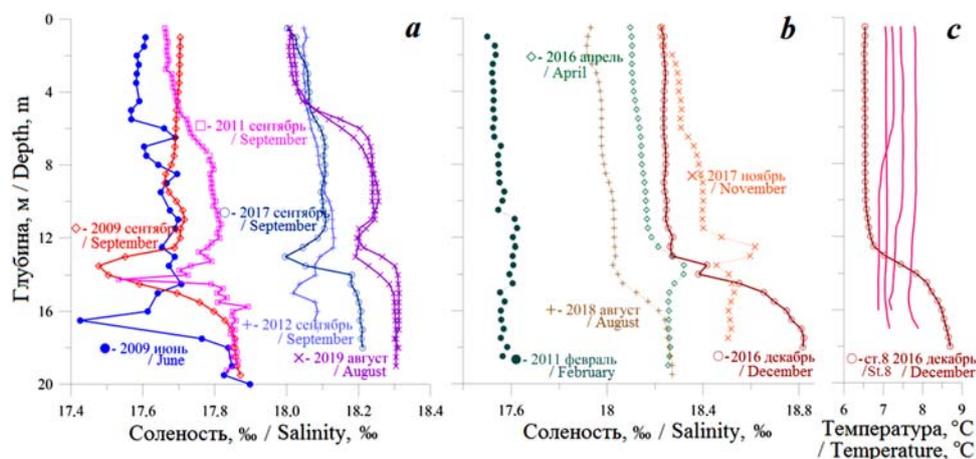


Рис. 3. Вертикальные профили солености (ст. 8) с ее понижением (а) и повышением (b) на глубинах и вертикальный профиль температуры (ст. 8) и близлежащих станциях (с)

Fig. 3. Vertical salinity profiles (Station 8), decrease (a), increase (b) of salinity at depths and vertical temperature profile at Station 8 and surrounding stations (c)

(в 6 из 36 съемок) (рис. 3, а), но и повышенной солености, зафиксированный в трех случаях за последние 10 лет (рис. 3, b). Кроме того, в декабре 2016 г. и августе 2018 г. в районе ст. 8 было обнаружено монотонное увеличение солености с глубины 14 м (рис. 3, b). Причем, если по данным августа 2018 г. можно предположить, что в углубление под станцией ранее затекала вода с соленостью около 18.3 ‰, то данные о солености придонной воды (18.8 ‰) в этом районе в декабре 2016 г. не оставляют сомнений в том, что источник осолонения никак не связан с водами открытой части моря.

Анализ вертикальных профилей температуры в районе ст. 8 в декабре 2016 г. (рис. 3, с) и августе 2018 г. (на рисунке не приводится, поскольку возникновение термоклина является вполне типичным для летнего сезона) также показывает отклонения в профилях по сравнению с близлежащими станциями. Если понижение температуры в августе 2018 г. можно объяснить продолжающимся прогревом вод, замедляющимся ниже горизонта 14 м, то в декабре 2016 г. конвективное перемешивание при охлаждении поверхностных вод должно было привести к однородному вертикальному профилю по всей глубине. Это и наблюдается на профилях температуры для соседних станций. Однако в районе ст. 8 охлажденные поверхностные воды не смогли проникнуть до дна через более плотные (соленые) придонные воды, которые вследствие этого сохранили более высокую температуру.

Как видно из рис. 3, b, с, повышенная соленость придонных вод в районе ст. 8 замедлила процесс зимнего конвективного перемешивания и вместе с ним поступление кислорода из насыщенных им поверхностных вод. Ухудшение вентилирования придонных вод в районе ст. 8 в зимний период может быть еще одним фактором, способствующим возникновению в этом районе гипоксии летом.

Соленость, равная 18.8 ‰, никогда не наблюдалась в водах Севастопольской бухты, максимальная величина солености в этой бухте за все годы

Таблица 2. Величина рН и содержание биогенных элементов (мкМ) в придонных гипоксических водах ст. 8 на глубине 18–20 м и в придонных водах соседней ст. 9 на глубине 10–12 м

Table 2. The pH value and content of nutrients (μM) in the bottom hypoxic waters of St. 8 at a depth of 18–20 m and in the bottom waters of neighboring St. 9 at a depth of 10–12 m

Год / Year	рН		Кремнекислота / Silicic acid		Фосфаты / Phosphates		Фосфор (орг.) / Phosphorus (org.)		Нитраты / Nitrates		Нитриты / Nitrites		Аммоний / Ammonium	
	ст. 8 / St. 8	ст. 9 / St. 9	ст. 8 / St. 8	ст. 9 / St. 9	ст. 8 / St. 8	ст. 9 / St. 9	ст. 8 / St. 8	ст. 9 / St. 9	ст. 8 / St. 8	ст. 9 / St. 9	ст. 8 / St. 8	ст. 9 / St. 9	ст. 8 / St. 8	ст. 9 / St. 9
2009*	7.86	8.40	23.10	1.90	2.54	0.19	0.46	0.09	0	0.51	0	0.07	33.8	1.7
2014	7.92	8.25	21.30	7.70	3.65	0.04	0.38	0.49	0.99	1.45	0.02	0.08	40.7	2.9
2015	7.85	8.24	29.70	5.10	5.20	0.03	–	–	1.47	1.66	0.01	0.05	35.2	0.9
2016	8.03	8.28	1.03	0.25	0.70	0.02	15.15	0.74	1.91	1.89	0.51	0.07	25.9	1.2
2018	8.09	8.29	16.00	5.50	0.81	0.02	0.23	0.12	2.22	1.58	0.30	0.04	21.3	0.5

\* В районе ст. 8 обнаружен сероводород с концентрацией 37 мкМ / Hydrogen sulphide with a concentration of 37 μM was found at St. 8.

наблюдений не превышала 18.3 ‰. Следовательно, источник осолонения (то есть повышенной проводимости вод, фиксируемой датчиком) находится на дне углубления в районе ст. 8. Здесь вполне уместно предположить действие как природного, так и антропогенного фактора. Косвенным доказательством этого предположения является низкая величина рН (8.11) придонных вод ст. 8 в декабре 2016 г., тогда как величина рН окружающих вод была на уровне 8.25–8.30.

Процесс возникновения гипоксии является результатом одновременного действия двух факторов – стратификации, ограничивающей вертикальный обмен, и расхода кислорода – на минерализацию ВОВ [22]. После исчерпания растворенного в воде кислорода начинается его потребление из окисных форм азота (нитратов и нитритов, которые переходят в аммоний) и затем из сульфатов, которые превращаются в сероводород. В нашем случае это положение подтверждается данными по концентрации биогенных элементов (прежде всего форм азота) в придонных водах ст. 8 (табл. 2), когда они находились в условиях гипоксии (см. табл. 1). Для сравнения те же параметры даны для расположенной рядом станции 9.

Следует отметить заметное уменьшение величины рН, гораздо более высокое содержание кремнекислоты (повышение в 3–10 раз), фосфатов (в 10–100 раз), аммония (в 10–20 раз). В сентябре 2009 г.

в сероводородной воде отсутствовали окисленные формы азота (нитраты и нитриты). Это полностью соответствует тому представлению, что при недостатке кислорода его извлечение сначала происходит из окисленных форм азота, а уже затем из сульфатов.

Возникновение зоны придонной гипоксии на границе вода – донные отложения приводит к извлечению из донных отложений в придонные воды минеральных форм азота, фосфора и кремния [23]. Таким образом, донные отложения в углублении под ст. 8 становятся дополнительным источником биогенных элементов (см. рис. 4), точно так же, как это происходит на северо-западном шельфе Черного моря [24]. Иными словами, в районе от Киллен-бухты до устья р. Черной в теплое время года существует еще один источник биогенных элементов. Вероятнее всего, он сыграл свою роль в том, что при районировании Севастопольской бухты эта акватория была оценена как наиболее загрязненная [1].

В дальнейших исследованиях предполагается с помощью математической модели сравнить влияние термоклина и слоя распресненных вод на вертикальный обмен. Кроме того, необходимо оценить количество поступающего органического вещества, на окисление которого расходуется кислород.

#### Предполагаемая возможность экологической катастрофы

Для приблизительной оценки общего количества сероводорода, которое может образоваться в углублении возле ст. 8, следует принять во внимание, что площадь углубления равна примерно  $300 \times 80$  м, толщина слоя сероводорода (по данным 2009 г.) – около 2 м, тогда общий объем сероводородных

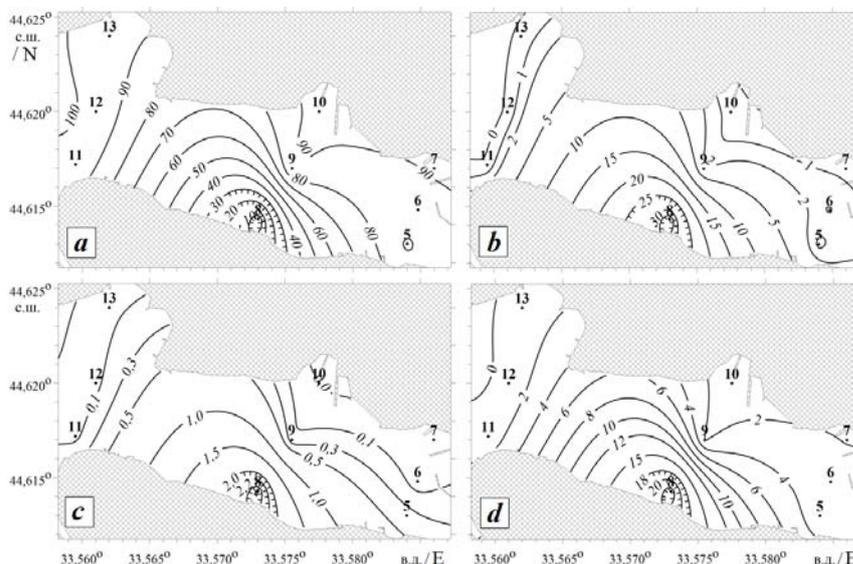


Рис. 4. Процент насыщения кислородом (a) и содержание (мкМ) ионов аммония (b), фосфатов (c) и кремнекислоты (d) в придонных водах ст. 8 и близлежащих станций 5–7 и 9–13 в сентябре 2009 г.

Fig. 4. Percentage of oxygen saturation (a) and content ( $\mu\text{M}$ ) of ammonium ions (b), phosphates (c), and silicic acid (d) in the bottom waters of St. 8 and neighbouring St. 5–7 and 9–13 in September 2009

вод будет составлять примерно  $50\,000\text{ м}^3 (5 \cdot 10^7\text{ л})$ . Полагая среднюю концентрацию сероводорода в слое равной  $40\text{ мкМ}$  ( $37\text{ мкМ}$  в сентябре 2009 г. обнаружены в 1 м над поверхностью углубления, ниже глубины отбора содержание сероводорода явно превышает это значение), получим, что в углублении содержится примерно  $5 \cdot 10^7\text{ л} \times 40 \cdot 10^{-6}\text{ моль} = 2000\text{ моль}$ , или  $68\text{ кг}$  сероводорода.

Если в случае каких-либо экстремальных условий (например, при погружении дока и полном вытеснении воды из углубления) образовавшийся на ст. 8 сероводород перейдет в воды бухты, то масштабной экологической катастрофы в размере акватории всей бухты не должно произойти. Кислорода в окружающих водах достаточно для окисления вышеприведенного количества сероводорода. Только в поверхностном 10-метровом слое вод непосредственно над углублением, объем которого равен примерно  $300 \cdot 80 \cdot 10 = 24 \cdot 10^4\text{ м}^3 (24 \cdot 10^7\text{ л})$ , при концентрации кислорода  $200\text{ мкмоль/л}$  содержится ориентировочно  $24 \cdot 10^7\text{ л} \times 200 \cdot 10^{-6}\text{ моль/л} \approx 50\,000\text{ моль}$  кислорода, что более чем в 10 раз превышает количество сероводорода (при стехиометрии реакции  $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$ ). Однако недостаток кислорода вследствие его расхода на окисление сероводорода в придонных водах в районе ст. 8 может привести к замору рыбы.

### Выводы

1. Возникновение гипоксических условий в придонных водах ст. 8 связано с искусственным углублением дна на 10 м в районе этой станции, сделанным для погружения плавучего дока.

2. Образующийся в мае – июне термоклин и слой менее соленых вод на горизонте 10–14 м ослабляют вертикальный обмен, что приводит к потреблению растворенного кислорода в процессе минерализации взвешенного органического вещества.

3. За последние 11 лет зафиксировано пять случаев возникновения гипоксических условий в районе ст. 8 в летнее время, при этом в сентябре 2009 и 2014 гг. процесс потребления растворенного кислорода завершился образованием сероводорода.

4. Возникновению гипоксии в районе ст. 8 может также способствовать сток р. Черной, устье которой находится в 2 км восточнее станции, а также круглогодичный сброс теплых вод с Севастопольской ТЭЦ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: [http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij\\_rezhim\\_sevastopolskoj\\_buhty\\_2006.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf) (дата обращения: 25.05.2020).
2. Морочковский В. А., Ковальчук Ю. Л. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты // Ихтиофауна черноморских бухт в условиях антропогенного воздействия. Киев : Наукова думка, 1993. С. 17–24.
3. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты / Е. В. Павлова [и др.] // Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу. Севастополь : Аквавита, 1999. С. 70–94. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/5248> (дата обращения: 15.04.2020).

4. Long-term changes in Sevastopol Bay (the Black Sea) with particular reference to the ichthyoplankton and zooplankton / A. D. Gordina [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2001. Vol. 52, iss. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0662>
5. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты в условиях антропогенного воздействия (по наблюдениям 1998–1999 гг.) / Е. И. Овсяный [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. С. 79–103.
6. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 138–152.
7. *Мионов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В.* Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/1466> (дата обращения: 15.04.2020).
8. Влияние океанографических факторов на экологическое состояние Севастопольской бухты (Черное море) / Л. Н. Репетин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2003. № 2. С. 66–80.
9. *Орехова Н. А., Медведев Е. В., Овсяный Е. И.* Влияние вод реки Черной на гидрохимический режим Севастопольской бухты (Черное море) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. Вып. 3. С. 84–91. doi:10.22449/2413-5577-2018-3-84-91
10. *Орехова Н. А., Коновалов С. К.* Кислород и сероводород в донных осадках Севастопольской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 18. С. 48–54.
11. *Орехова Н. А., Коновалов С. К.* Кислород и сульфиды в донных отложениях прибрежных районов Севастопольского региона Крыма // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 5. С. 739–750. doi:10.1134/S0030157418050106
12. *Svishchev S. V., Kondrat'ev S. I., Kononov S. K.* Regularities of seasonal variations in the content and distribution of oxygen in waters of the Sevastopol Bay // *Physical Oceanography*. 2011. Vol. 21, iss. 4. P. 280–293. doi:10.1007/s11110-011-9122-6
13. *Kondrat'ev S. I.* Specific features of the distribution of dissolved oxygen in waters of the Sevastopol Bay in 2006–2007 // *Physical Oceanography*. 2010. Vol. 20, iss. 2. P. 136–148. doi:10.1007/s11110-010-9073-3
14. Investigating hypoxia in aquatic environments: diverse approaches to addressing a complex phenomenon / J. Friedrich [et al.] // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11, iss. 4. P. 1215–1259. doi:10.5194/bg-11-1215-2014
15. *Методы гидрохимических исследований океана / Отв. ред. О. К. Бордовский, В. Н. Иваненков. М. : Наука, 1978. 271 с.*
16. *Современные методы гидрохимических исследований океана / Под ред. О. К. Бордовского, А. М. Черняковой. М. : ИО АН СССР, 1992. 199 с.*
17. *Belokopytov V. N.* “Oceanographer”: applied software for oceanographic surveys // *International Symposium on Information Technology in Oceanography (ITO-98): Abstracts*. Goa, India, 12–16 October, 1998. Goa, 1998. P. 79.
18. *Берлинский Н. А., Гаркавая Г. П., Богатова Ю. И.* Проблемы антропогенного эвтрофирования и развития гипоксии в северо-западной части Черного моря // *Экология моря*. 2003. Вып. 63. С. 17–22.

19. *Ukrainskii V. V., Popov Yu. I.* Climatic and hydrophysical conditions of the development of hypoxia in waters of the northwest shelf of the Black Sea // *Physical Oceanography*. 2009. Vol. 19, iss. 3. Article 140. <https://doi.org/10.1007/s11110-009-9046-6>
20. *Orekhova N. A., Varenik A. V.* Current hydrochemical regime of the Sevastopol Bay // *Physical Oceanography*. 2018. Vol. 25, iss. 2. P. 124–135. doi:10.22449/1573-160X-2018-2-124-135
21. *Ovsyany E. I., Orekhova N. A.* Hydrochemical regime of the River Chernaya (Crimea): Environmental aspects // *Physical Oceanography*. 2018. Vol. 25, iss. 1. P. 77–88. doi:10.22449/1573-160X-2018-1-77-88
22. *Diaz R. J.* Overview of hypoxia around the world // *Journal of Environmental Quality*. 2001. Vol. 30, iss. 2. P. 275–281. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.302275x>
23. Biogeochemical transformations of inorganic nutrients in the mixing zone between the Danube River and the north-western Black Sea / O. Ragueneau [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2002. Vol. 54, iss. 3. P. 321–336. doi:10.1006/ecss.2000.0650
24. *Grégoire M., Lacroix G.* Exchange processes and nitrogen cycling on the shelf and continental slope of the Black Sea basin // *Global Biogeochemical Cycles*. 2003. Vol. 17, iss. 2. 1073. doi:10.1029/2002GB001882

*Об авторах:*

**Кондратьев Сергей Иванович**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат химических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2049-7750**, **Scopus Author ID: 35784380700**, **ResearcherID: F-8972-2019**, [skondratt@mail.ru](mailto:skondratt@mail.ru)

**Видничук Анна Владимировна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-0889-020X**, **ResearcherID: AAO-2592-2020**, [anna\\_yidnichuk@mhu-ras.ru](mailto:anna_yidnichuk@mhu-ras.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

**Кондратьев Сергей Иванович** – формулировка целей и задач исследования, анализ литературных данных, анализ результатов и их интерпретация, обсуждение результатов работы, подготовка текста статьи

**Видничук Анна Владимировна** – анализ литературы по проблеме исследования, сбор и систематизация данных, построение рисунков и графиков, обсуждение результатов работы

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Ivanov, V.A., Ovsyany, E.I., Repetin, L.N., Romanov, A.S. and Ignatyeva, O.G., 2006. *Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sevastopol Bay and Its Changing under Influence of Climatic and Anthropogenic Factors*. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine, 90 p. (in Russian).
2. Morochkovskiy, V.A. and Kovalchuk, Yu.L., 1993. [Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sevastopolskaya Bay]. In: L.S. Oven, ed., 1993. [*Ichthyofauna of the Black Sea Bays under Anthropogenic Impact*]. Kiev: Naukova Dumka, pp. 17–24 (in Russian).
3. Pavlova, E.V., Ovsjanyi, E.I., Gordina, A.D., Pomanov, A.S. and Kemp, R.B., 1999. Modern State and Tendencies of Change in Sevastopol Bay Ecosystem. In: E. V. Pavlova

- and N.V. Shadrin, eds., 1999. *Sevastopol Aquatory and Coast: Ecosystem Processes and Services for Human Society*. Sevastopol: Aquavita Publ., pp. 70–94 (in Russian).
4. Gordina, A.D., Pavlova, E.V., Ovsyany, E.I., Wilson, J.G., Kemp, R.B. and Romanov, A.S., 2001. Long-term Changes in Sevastopol Bay (the Black Sea) with Particular Reference to the Ichthyoplankton and Zooplankton. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52(1), pp. 1–13. doi:10.1006/ecss.2000.0662
  5. Ovsyany, E.I., Kemp, R.B., Repetin, L.N. and Romanov, A.S., 2000. [Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sevastopol Bay under Conditions of Anthropogenic Impact (according to Observations 1998–1999)]. In: MHI, 2000. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 1, pp. 79–103 (in Russian).
  6. Ovsyany, E.I., Romanov, A.S., Min'kovskaya, R.Ya., Krasnovid, I.I., Ozyumenko, B.A. and Zymbal, I.M., 2001. The Most Important Sources of Pollution for the Marine Environment of the Coastal Zone of Sevastopol. In: MHI, 2001. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 2, pp. 138–152 (in Russian).
  7. Mironov, O.G., Kirjukhina, L.N. and Alyomov, S.V., 2003. *Sanitary-Biological Aspects of the Sevastopol Bays Ecology in XX Century*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. 185 p. (in Russian).
  8. Repetin, L.N., Gordina, A.D., Pavlova, E.V., Romanov, A.S. and Ovsyany, E.I., 2003. [Impact of Oceanographic Factors on the Ecological State of the Sevastopol Bay (Black Sea)]. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, (2), pp. 66–80 (in Russian).
  9. Orekhova, N.A., Medvedev, E.V. and Ovsyany, E.I., 2018. Influence of the River Chernaya Water on Hydrochemical Regime of the Sevastopol Bay (the Black Sea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones*, (3), pp. 84–91. doi:10.22449/2413-5577-2018-3-84-91 (in Russian).
  10. Orekhova, N.A. and Konovalov, S.K., 2009. Oxygen and Sulfide in Bottom Sediments of the Sevastopol Bay. In: MHI, 2009. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 18, pp. 48–56 (in Russian).
  11. Orekhova, N.A. and Konovalov, S.K., 2018. Oxygen and Sulfides in Bottom Sediments of the Coastal Sevastopol Region of Crimea. *Oceanology*, 58(5), pp. 679–688. doi:10.1134/S0001437018050107
  12. Svishech, S.V., Kondrat'ev, S.I. and Konovalov, S.K., 2011. Regularities of Seasonal Variations in the Content and Distribution of Oxygen in Waters of the Sevastopol Bay. *Physical Oceanography*, 21(4), pp. 280–293. doi:10.1007/s11110-011-9122-6
  13. Kondrat'ev, S.I., 2010. Specific Features of the Distribution of Dissolved Oxygen in Waters of the Sevastopol Bay in 2006–2007. *Physical Oceanography*, 20(2), pp. 136–148. <https://doi.org/10.1007/s11110-010-9073-3>
  14. Friedrich, J., Janssen, F., Aleynik, D., Bange, H.W., Boltacheva, N., Çagatay, M.N., Dale, A.W., Etiope, G. and Erdem, Z. [et al.], 2014. Investigating Hypoxia in Aquatic Environments: Diverse Approaches to Addressing a Complex Phenomenon. *Biogeosciences*, 11(4), pp. 1215–1259. <https://doi.org/10.5194/bg-11-1215-2014>
  15. Bordovskiy, O.K. and Ivanenkov, V.N., eds., 1978. [*Ocean Hydrochemical Research Methods*]. Moscow: Nauka, 271 p. (in Russian).

16. Bordovskiy, O.K. and Chernyakova, A.M., eds., 1992. [*Modern Methods of Hydrochemical Research of the Ocean*]. Moscow: IO AN SSSR, 201 p. (in Russian).
17. Belokopytov, V.N., 1998. "Oceanographer": Applied Software for Oceanographic Surveys. In: NIO, 1998. *International Symposium on Information Technology in Oceanography (ITO-98): Abstracts*. Goa, India. 12–16 October, 1998. Goa, pp. 79.
18. Berlinsky, N.A., Garkavaya, G.P. and Bogatova, J.I., 2003. Anthropogenic Eutrophication Problems and Hypoxia Development in the Northwestern Part of the Black Sea. *Ekologiya Morya = Ecology of the Sea*, 63, pp. 17–22 (in Russian).
19. Ukrainskii, V.V. and Popov, Yu.I., 2009. Climatic and Hydrophysical Conditions of the Development of Hypoxia in Waters of the Northwest Shelf of the Black Sea. *Physical Oceanography*, 19(3), 140. <https://doi.org/10.1007/s11110-009-9046-6>
20. Orekhova, N.A. and Varenik, A.V., 2018. Current Hydrochemical Regime of the Sevastopol Bay. *Physical Oceanography*, 25(2), pp. 124–135. doi:10.22449/1573-160X-2018-2-124-135
21. Ovsyany, E.I. and Orekhova, N.A., 2018. Hydrochemical Regime of the River Chernaya (Crimea): Environmental Aspects. *Physical Oceanography*, 25(1), pp. 77–88. doi:10.22449/1573-160X-2018-1-77-88
22. Diaz, R.J., 2001. Overview of Hypoxia around the World. *Journal of Environmental Quality*, 30(2), pp. 275–281. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.302275x>
23. Ragueneau, O., Lancelot, C., Egorov, V., Vervlimmeren, J., Cociasu, A., Déliat, G., Krastev, A., Daoud, N. and Rousseau, V. [et al.], 2002. Biogeochemical Transformations of Inorganic Nutrients in the Mixing Zone between the Danube River and the North-Western Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(3), pp. 321–336. doi:10.1006/ecss.2000.0650
24. Grégoire, M. and Lacroix, G., 2003. Exchange Processes and Nitrogen Cycling on the Shelf and Continental Slope of the Black Sea Basin. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2), 1073. doi:10.1029/2002GB001882

*About the authors:*

**Sergey I. Kondratev**, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Chem.), **ORCID ID: 0000-0002-2049-7750**, **Scopus Author ID: 35784380700**, **ResearcherID: F-8972-2019**, [skondratt@mail.ru](mailto:skondratt@mail.ru)

**Anna V. Vidnichuk**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-0889-020X**, **ResearcherID: AAO-2592 -2020**, [anna\\_vidnichuk@mhu-ras.ru](mailto:anna_vidnichuk@mhu-ras.ru)

*Contribution of the authors:*

**Sergey I. Kondratev** – statement of the research objectives and tasks, analysis of literature data, analysis of the results and their interpretation, discussion of the work results, preparation of the article text

**Anna V. Vidnichuk** – analysis of literature on the research problem, data collection and systematization, construction of figures and graphs, discussion of the work results

*All the authors have read and approved the final manuscript.*