

Влияние сезонной стратификации в Севастопольской бухте на содержание метана в воде

И. Н. Иванова^{1,*}, А. А. Будников^{1,†}, Т. В. Малахова^{2,‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского РАН, Россия, 299011, Севастополь, пр. Нахимова, д. 2

(Статья поступила 25.06.2018; Подписана в печать 06.08.2018)

Показано, что устойчивая летняя плотностная стратификация может блокировать поступление метана с придонными слоями воды к поверхности, в то время, как интенсивное конвективное зимнее перемешивание повышает его содержание вблизи поверхности за счет поступления насыщенных метаном придонных масс воды. Основное влияние на гидрофизические процессы в бухте в августе, феврале и апреле оказывают морские воды. Влияние вод реки Черная значимо только в кутовой части бухты, где для зимнего и летнего сезонов были получены максимальные значения концентрации растворенного в воде метана.

PACS: 92.05.Nj, 92.10.Lq, 92.20.cf УДК: 551.46.06

Ключевые слова: сезонная стратификация, интрузия, метан, эмиссия метана, Севастопольская бухта.

ВВЕДЕНИЕ

Морской шельф продуцирует и накапливает большое количество органического материала, продуктом распада которого является метан (CH_4), один из наиболее важных парниковых газов, теплоёмкость которого в 20 раз превышает теплоёмкость CO_2 . Не смотря на то, что шельф и эстуарии представляют собой лишь малую часть от площади Мирового океана, их вклад в бюджет атмосферного метана составляет более 75% от глобального океанического потока CH_4 [1]. Так, например, исследованиями последнего десятилетия показано особое значение арктического шельфа в балансе атмосферного метана [2].

Среди внутренних морей Черное море является одним из самых мощных метановых резервуаров [3]. Антропогенное воздействие на черноморские экосистемы, которое многократно возросло за последние десятилетия, влияет на их насыщение биогенными элементами, и особенно чувствительны к этому оказываются прибрежные районы [4]. Было показано, что в водоемах с более высоким трофическим статусом продукция метана выше, а также они более восприимчивы к температурным колебаниям [5].

Для изучения процессов формирования и распределения метана в воде и донных отложениях в прибрежных районах океанов, морей необходимо учитывать сезонные особенности гидрофизических режимов водоемов [6]. Также важен анализ влияния интрузии впадающих рек на гидрологический и биохимический режим водоемов. В работе рассматриваются сезонные измене-

ния в Севастопольской бухте таких параметров воды, как температура, соленость, растворенный кислород, мутность воды, а также содержание метана CH_4 и его эмиссия в атмосферу.

1. ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ



Рис. 1: Карта-схема станций в Севастопольской бухте. Стрелками отмечены станции, на которых проводились измерения зондами RCM 9 LW (Aanderaa) и YSI 600 OMS

Серия комплексных зондирований была проведена в Севастопольской бухте в августе 2017 г., в феврале и апреле 2018 г. с борта маломерного судна ФГБУН ИМБИ на постоянных станциях (рис. 1). Измерения проводились многопараметрическими зондами RCM 9 LW (Aanderaa Instruments) и YSI 600OMS (YSI Incorporated) [7]. С шагом 1 м по глубине измерялись скорость U , температура T , электропро-

*E-mail: ivair@yandex.ru

†E-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru

‡E-mail: t.malakhova@imbr-ras.ru

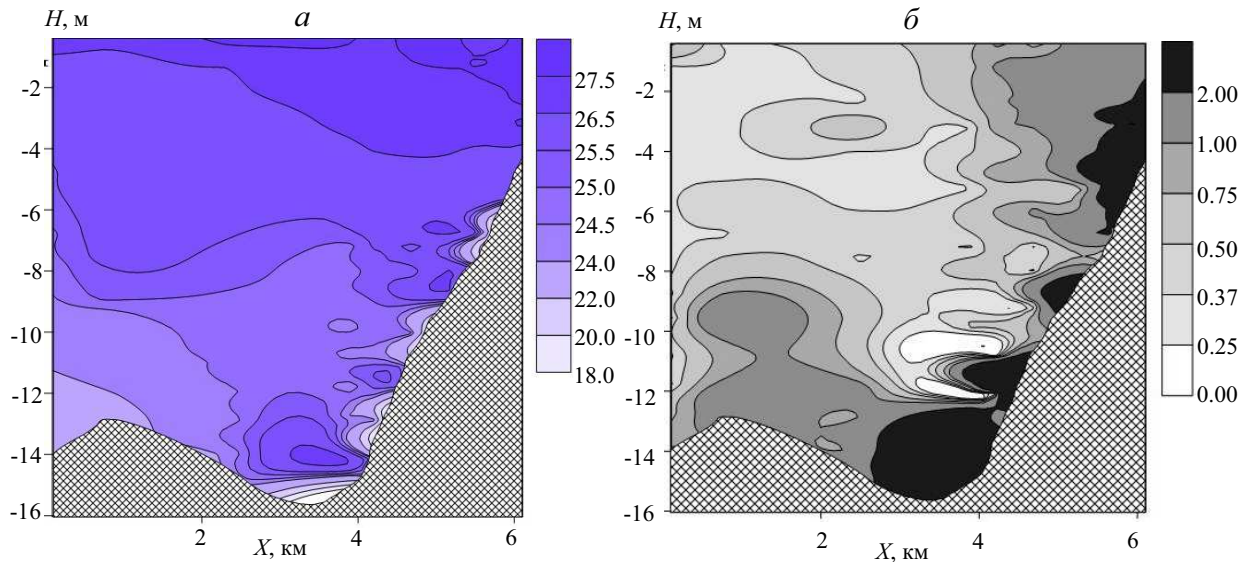


Рис. 2: Распределения *a* — температуры T ($^{\circ}\text{C}$) и *b* — мутности Tu (NTU) по глубине и вдоль по разрезу от выхода в открытое море к кутовой части бухты (устье реки Черная) в августе 2017 г.

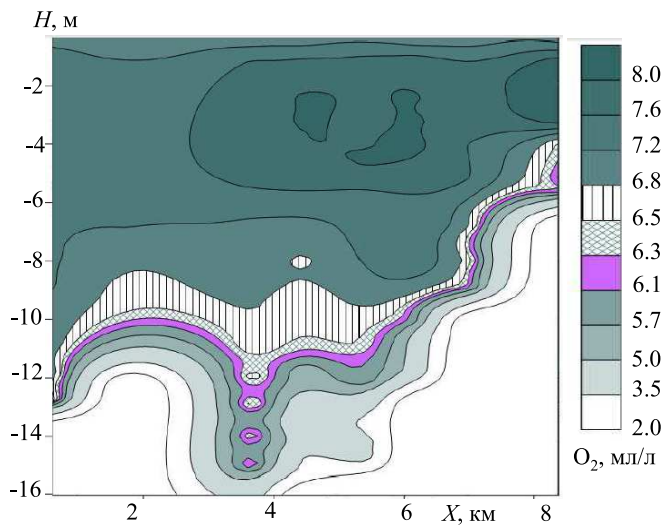


Рис. 3: Распределение растворенного кислорода по глубине и вдоль по разрезу от устьевой зоны (р. Черная) к выходу в открытое море в августе 2017 г.

водность S_k , концентрация растворенного кислорода O_2 и мутность воды Tu . Точность измерений U , T , S_k , O_2 и Tu составляли 0.5 см/с, 0.02 $^{\circ}\text{C}$, 0.02 мСм/см, 0.25 мг/л и 0.4 NTU. Параллельно измерялись скорость ветра Uw и его направление, температура воздуха $Tв$. Содержание CH_4 в поверхностной воде определяли на 25 станциях методом фазово-равновесной дегазации [8]. Измерения проводили на хроматографе HP 5890 с набивной колонкой и пламенно-ионизационным детектором. Расчет ча-

стоты Вьяйсяля–Брента проводился по формуле:

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho(z)} \frac{d\rho(z)}{dz}} \quad (1)$$

где g — ускорение силы тяжести, $\rho(z)$ — зависящая от z плотность жидкости, ордината z направлена от дна к открытой поверхности.

2. ЛЕТНЯЯ СТРАТИФИКАЦИЯ

Измерения в августе 2017 г. проводились в условиях сильной летней плотностной стратификации (средняя по глубине частота Вьяйсяля–Брента $N = 19 \cdot 10^{-2}$ Гц). Преобладал северо-восточный ветер со скоростью $Uw=2-4$ м/с, температура воздуха $Tв=31-32^{\circ}\text{C}$, волнение 0–1 балла. Вертикальное распределение модуля скорости показывает, что на протяжении всего разреза, где проводились измерения, наблюдался придонный поток толщиной 3–4 м, скорость которого максимальна вблизи устья (0.3 м/с) и уменьшается в морском направлении (0.1 м/с). На рис. 2 показаны распределение температуры воды T и мутности Tu по глубине и вдоль по разрезу, где величина x — расстояние в км. от первой станции под номером 4, где проводились измерения.

Заметное опреснение в бухте не наблюдается. Вблизи устья реки Черная зарегистрировано повышение концентрации взвеси, которая имеет речное происхождение, так как главным источником поступления взвеси в бухту является река Черная. Видно, что основная часть взвеси сосредоточена в придонной области кутовой и центральной частях бухты. Полученные данные по температуре и распределению концентрации взве-

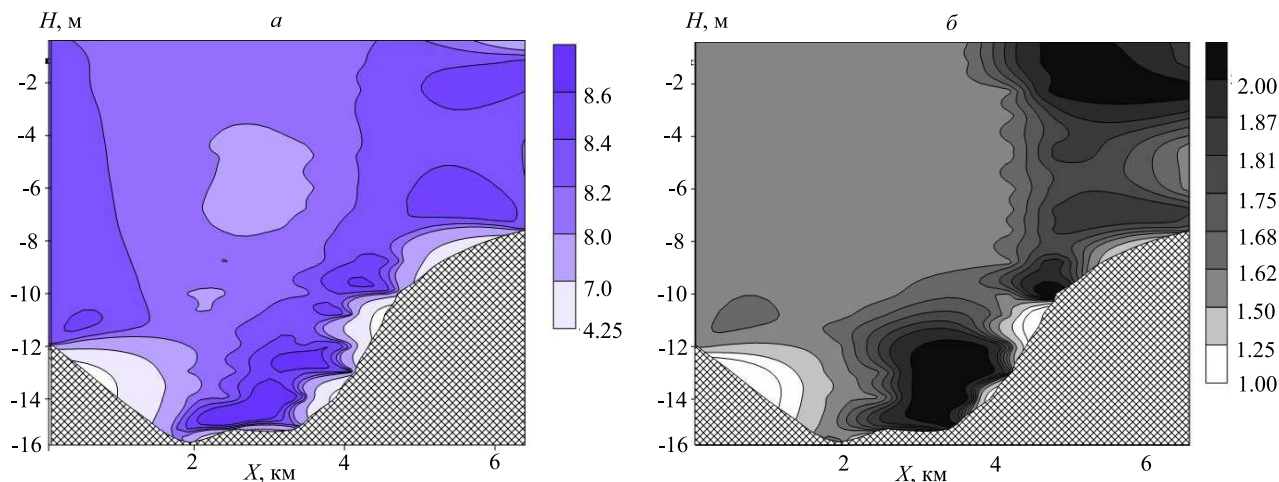


Рис. 4: Распределения *a* — температуры T ($^{\circ}\text{C}$) и *b* — мутности Tu (NTU) по глубине и вдоль по разрезу от выхода в открытое море к кутовой части бухты (устье реки Черная) в феврале 2018 г.

си показывают, что более холодная и чистая вода из открытого моря фактически блокирует интрузию вод реки Черная в середине Севастопольской бухты.

На рис. 3 показано распределение растворенного кислорода O_2 по глубине на станциях, где проводились зондирования.

Влияние речного стока на O_2 в придонных слоях прослеживается по всей бухте. По данным измерений в придонных слоях воды Севастопольской бухты содержание O_2 летом снижалось до значений 2 мл/л, что соответствует верхней границе условной гипоксии. Формирование придонных зон гипоксии связано с устойчивой стратификацией, которая затрудняет аэрацию, и интенсивными биохимическими процессами потребления кислорода. Аналогичные результаты, показывающие блокировку вод реки Черная морскими водами получены в работе [9] для июня месяца.

Диапазон концентраций метана в поверхностной воде бухты в августе находился в пределах от 22 до 122 нмоль·л $^{-1}$ (среднее 64 нмоль·л $^{-1}$). Пространственное распределение метана имело неравномерный характер: более высокие концентрации были измерены в кутовой части бухты, при этом в центральной части обнаруживалось несколько локальных максимумов. Усредненный поток метана из воды в атмосферу составил 22 мкмоль·м $^{-2}$ ·сут $^{-1}$.

3. ЗИМНЯЯ СТРАТИФИКАЦИЯ

Аналогичная серия комплексных зондирований по семи станциям от устьевой зоны к кутовой части бухты была проведена 20 февраля 2018 г. с 9.00 до 15.00. В это время года происходит интенсивное конвективное опускание холодных поверхностных вод, что ведет к равномерному перемешиванию. Данные были получены при слабой зимней стратификации (средняя по глубине частота Вайсяля–Брента $N = 7 \cdot 10^{-2}$ Гц),

ветре со скоростью $Uw=5-6$ м/с северо-восточного направления, температуре воздуха $Tв=2-6^{\circ}\text{C}$, волнении 1–2 балла. Вертикальная структура измеренного модуля скорости показала, что выраженный придонный плотностной поток, переносящий оседающие частицы взвеси, наблюдался только на ближайших к устью первых трех станциях. Толщина потока составляла 4 м. В поверхностном слое под воздействием ветра формировалось дрейфовое течение, скорость которого увеличивалась по мере приближения к открытому морю и составляла 0.2–0.25 м/с. В поле температуры было получено равномерное перемешивание по всей глубине в бухте, кроме увеличения на 1–2 $^{\circ}\text{C}$ вблизи устья реки Черная. На рис. 4 показаны распределение T и Tu по глубине и вдоль по разрезу.

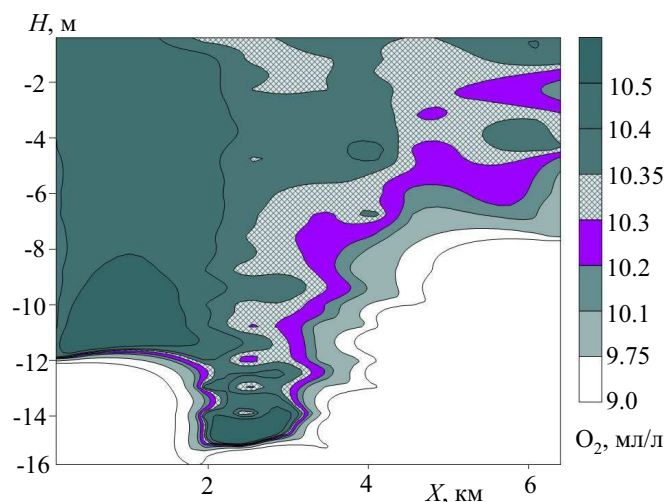


Рис. 5: Распределение растворенного кислорода по глубине и вдоль по разрезу от выхода в открытое море к устьевой зоне р. Черная в феврале 2018 г.

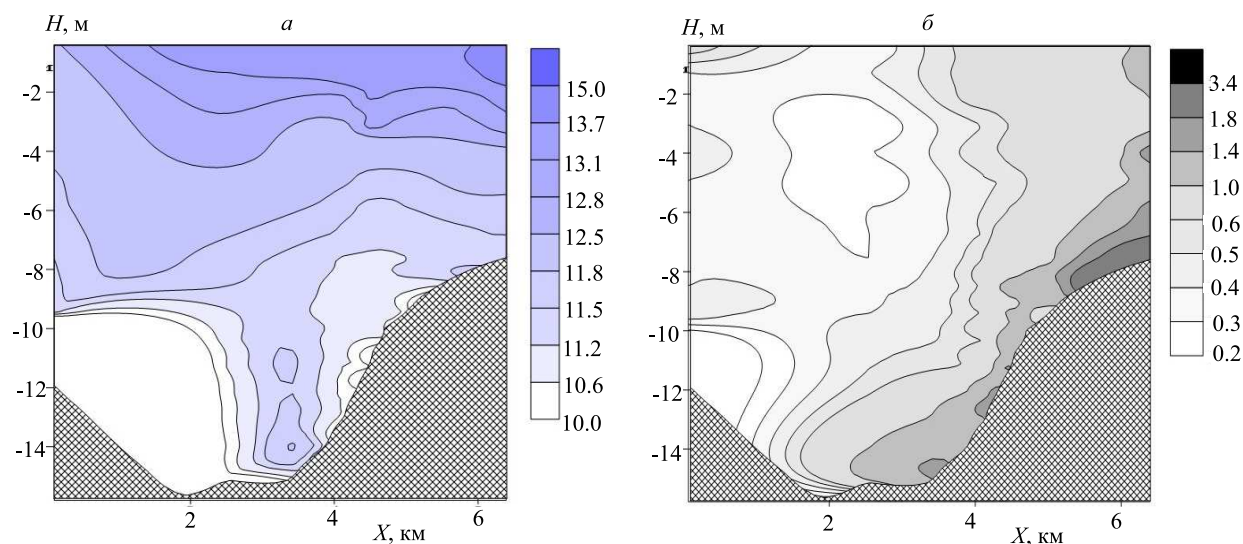


Рис. 6: Распределения *a* — температуры T ($^{\circ}\text{C}$) и *b* — мутности Tu (NTU) по глубине и вдоль по разрезу от выхода в открытое море к кутовой части бухты (устье реки Черная) в апреле 2018 г.

Заметное опреснение в поверхностном слое наблюдалось только вблизи устья реки Черная. Взвесь, приносимая рекой, распространялась дальше, чем в августе, но так же была в основном сосредоточена в кутовой части Севастопольской бухты и в придонном слое центральной части.

На рис. 5 приводится распределение растворенного кислорода O_2 по глубине на станциях, где проводились зондирования для февраля 2018 г.

Содержание O_2 в поверхностных водах в приустьевой зоне было примерно на 0.2–0.3 мл/л меньше, по сравнению с остальной акваторией бухты, что соответствует его уменьшению при увеличении температуры на 1°C . Аналогичные данные получены в работе [9]. Измерения в зимний период показывают, что при слабой стратификации и северо-восточном ветре 5–6 м/с, влияние вод реки Черная на гидрофизические процессы в бухте оказывается незначительно.

В феврале диапазон концентраций метана в воде составил 11–188 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$ (среднее 74 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$). Также, как и летом, максимум отмечался в кутовой части бухты — наиболее распресненной по сравнению с остальной частью акватории. Среднее значение эмиссии метана в атмосферу составило 61 $\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$.

В серии измерений, проведенных в апреле 2018 г. на тех же станциях, что и в феврале, были получены данные по распределениям T , S и NTU . На представленных на рис. 6. распределениях этих параметров хорошо заметен начинающийся весенний прогрев вод. Влияние интрузии вод реки Черная, как и при предыдущих измерениях в августе 2017 г. и феврале 2018 г., незначительно. Видно, что основная часть частиц взвеси не доходит до середины бухты, оседая на дно.

Диапазон концентраций метана в поверхностной воде бухты в апреле находился в пределах от 6 до

109 $\text{нмоль}\cdot\text{л}^{-1}$. Пространственное распределение метана имело четко выраженный эстуарный характер: концентрация метана уменьшалась в направлении от места впадения р. Черной к открытому морю. Значения потока метана с поверхности воды в атмосферу находились в диапазоне от 2 до 51 $\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$, среднее — 19 $\text{мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Источником метана в бухте могут быть как процессы его продукции непосредственно в толще воды, так и поступление за счет диффузии из донных осадков, которое имеет особое значение для мелководных хорошо перемешиваемых акваторий.

Летом сезонный термоклин является основной причиной формирования сезонного пикноклина [10], наличие которого препятствует перемешиванию водных масс и проникновению растворенных веществ из глубин к поверхности. В этот период в толще воды под пикноклином могут формироваться слои, обогащенные метаном, который поступает из донных осадков [11]. Мы предполагаем, что в условиях летней плотностной стратификации концентрации метан в поверхностном слое вод должен обеспечиваться процессами образования в толще, лежащей над термоклином. Например, биогенной продукцией метана археями (одноклетчатыми микроорганизмами) в анаэробных микронишах: конгломератах органических частиц, кишечниках зоопланктона, или на поверхности клеток фитопланктона.

Вследствие зимней конвекции происходит разрушение прежней стратификации, что приводит к выносу метана на поверхность и его более однородному распределению с глубиной [11]. Это может обуславливать более высокие концентрации метана в поверхностной

воде Севастопольской бухты в зимний сезон по сравнению с летом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Основное влияние на гидрофизические процессы в Севастопольской бухте в августе и феврале, апреле оказывают морские воды. Влияние вод реки Черная фиксировалось только в кутовой части бухты, где для всех сезонов были получены максимальные значения концентрации растворенного в воде метана.

- В целом в августе наблюдались пониженные относительно февраля концентрации метана в поверхностном слое воды Севастопольской бухты. Данные свидетельствуют о том, что устойчивая летняя плотностная стратификация блокирует поступление метана с придонными слоями воды к поверхности, тогда как интенсивное конвективное зимнее перемешивание повышает его содержание за счет поступления насыщенных метаном придонных масс воды.

-
- | | |
|---|---|
| <p>[1] Bange H. W., Bartell U. H., Rapsomanikis S., Andreae M. O. <i>Global Biogeochemical Cycles</i>. 1994. N 8. P. 465.</p> <p>[2] Космач Д. А., Сергиенко В. И., Дударев О. В. и др. ДАН. 2015. 465. № 4. С. 441.</p> <p>[3] Леин А. Ю., Иванов М. В. <i>Природа</i>. № 2. 2005. С. 19.</p> <p>[4] Егоров В. Н. Биогеохимические механизмы реализации компенсационного гомеостаза в черноморских экосистемах Мор. экол. журн. 2012. 11, № 4. С. 5</p> <p>[5] Sepulveda-Jauregui A., Hoyos-Santillan J., Martinez-Cruz K. et al. <i>Science of The Total Environment</i>. 2018. 636. P. 411.</p> <p>[6] Malakhova L. V., Egorov V. N., Malakhova T. V. et al. <i>Geo-Marine Letters</i>. 2010. 30, N 3,4. P. 391.</p> | <p>[7] Самолюбов Б. И., Иванова И. Н. <i>Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.</i> 2014. № 5. С. 60.</p> <p>[8] Большаков А. М., Егоров А. В. <i>Океанология</i>. 1987. 27. № 5. С. 861.</p> <p>[9] Кондратьев С. И. <i>Морской гидрофизический журнал</i>. 2010. № 2. С. 63.</p> <p>[10] Иванов В. А., Белокопытов В. Н. <i>Океанография Черного моря</i>. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011.</p> <p>[11] Мишукова Г. И., Обжиров А. И., Мишуков В. Ф. <i>Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода-атмосфера в Дальневосточном регионе</i>. Владивосток: Дальнаука, 2007.</p> |
|---|---|

The influence of seasonal stratification in the Sevastopol Bay on the content of methane in the water

E. I. N. Ivanova^{1,a}, A. A. Budnikov^{1,b}, T. V. Malakhova^{2,c}

¹*Department of physics of sea and inland waters, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia*

²*The A.O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS, Sevastopol, 299011*
E-mail: ^aivair@yandex.ru, ^baa.budnikov@physics.msu.ru, ^ct.malakhova@imbr-ras.ru

It is shown that stable summer density stratification can block the flow of methane with bottom layers of water to the surface, while intensive convective winter mixing increases its content near the surface due to the receipt of methane-saturated bottom water masses. The main influence on hydrophysical processes in the bay in August, February and April is provided by sea water. The influence of the Chernaya river waters is significant only in the kutov part of the Bay, where the maximum concentration of methane dissolved in the water was obtained for the winter and summer seasons.

PACS: 92.05.Hj, 92.10.Lq, 92.20.cf.

Keywords: seasonal stratification, intrusion, methane, methane emission into the atmosphere, Sevastopol Bay.

Received 25 June 2018.

Сведения об авторах

1. Иванова Ирина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: ivair@yandex.ru.
2. Будников Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-41-19, e-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru.
3. Малахова Татьяна Владимировна — канд. биол. наук; ст. науч. сотрудник; e-mail: t.malakhova@imbr-ras.ru.