

Измерение гидрологических параметров воды над метановым сипом в бухте Ласпи в течение непрерывных *in situ* экспериментов

А. А. Будников^{1,*}, И. Н. Иванова^{1,†}, Т. В. Малахова^{2,‡}, Е. В. Кириллов¹

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, 2

(Статья поступила 29.06.2019; Подписана в печать 29.07.2019)

В работе рассматриваются гидрологические параметры морской воды над метановым сипом в бухте Ласпи. Показано, что основное влияние на параметры оказывает волнение, при котором наиболее существенно изменяются мутность воды и содержание растворенного кислорода. Обнаружены скачкообразные изменения значений содержания Tu и O_2 , длящиеся от получаса до часа. Выявлено, что береговые выносы не влияют на температуру, соленость и содержание растворенного кислорода в зоне действия сипа.

PACS: 92.05.Hj, 92.10.Lq, 92.60.Ek УДК: 551.46.06

Ключевые слова: метановый сип, растворенный кислород, струйные выделения метана, перенос примесей.

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие в прибрежной зоне Крыма было обнаружено множество новых местоположений струйных выделений метана. [1]. Источники естественных газовыделений распределены в пространстве неравномерно, и их интенсивность может быть самой разной, вплоть до залповых выбросов. Исследования струйных выходов природного газа из морского дна имеют важное климатическое значение для оценки вклада в общий объем природных источников парниковых газов, а также для картирования областей возможного залегания природного газового топлива [2].

Отдельное внимание необходимо уделять исследованию мелководных сипов, находящихся в непосредственной близости от береговой зоны, поскольку, во-первых, поток газа практически в полном объеме достигает поверхности воды и выходит в атмосферу, внося свой вклад в содержание парникового газа, а во-вторых, в прибрежных районах площадки метановых газовыделений могут являться зонами повышенной опасности при землетрясениях, когда подвижки земной коры провоцируют одномоментный выброс большого количества взрывоопасного газа.

Одной из составляющих подобных исследований является мониторинг состояния гидрологических параметров морской воды в непосредственной близости от действующих сипов с целью изучения возможного взаимного влияния характеристик газовых выделений и характеристик окружающей среды.

Целью данной работы являлось изучение динамики изменения гидрологических параметров воды

над метановым сипом в бухте Ласпи (44.420818 с. ш.; 33.706990 в. д.) (рис. 1). Многолетние наблюдения [3] показывают, что эти пузырьковые газовыделения имеют постоянный характер. По данным изотопного и углеводородного состава выделяющийся там газ является термогенным ($\delta^{13}C_{CH_4} = -35.3\% \text{ VPDB}$; $C_1/C_{2+} = 29$) [3].

1. ПОЛИГОН, МЕТОДИКА

Измерения проводились в прибрежной зоне бухты Ласпи (44.420818 с. ш.; 33.706990 в. д.) в августе 2016 г. и июле 2018 г. С помощью многопараметрического зонда RCM 9 LW AANDERAA INSTRUMENTS (Норвегия) измерялись температура T , электропроводность воды C_k , концентрация растворенного кислорода O_2 и концентрация взвеси Tu . Точности измерений T , C_k , O_2 и Tu составляли 0.02°C , $0.02 \text{ мСм}\cdot\text{см}^{-1}$, 0.25 мг/л и 0.4 NTU (в международных единицах мутности).

Сложный оползневой склон, обрамляющий бухту Ласпи, имеет сильно расчлененный рельеф и изрезан многочисленными эрозионными ложбинами, представляющими собой русла временных водотоков, которые во время выпадения осадков вносят в бухту мутную пресную воду, по своим параметрам сильно отличающуюся от морской, что, в свою очередь, оказывает влияние на распределение гидрологических параметров в прибрежной зоне.

Струйные газовыделения могут оказывать влияние на гидрохимический состав воды, а также на температурное распределение в вышележащей толще воды за счет барботирующих свойств. Механизм поступления пузырькового и флюидного газов в некоторых случаях связан с процессом субмаринной разгрузки пресных грунтовых вод, в связи с этим на площадках струйных газовыделений, ассоциированных с флюидными потоками, можно ожидать отличных от фоновых значений

*E-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru

†E-mail: ivair@yandex.ru

‡E-mail: t.malakhova@imbr-ras.ru

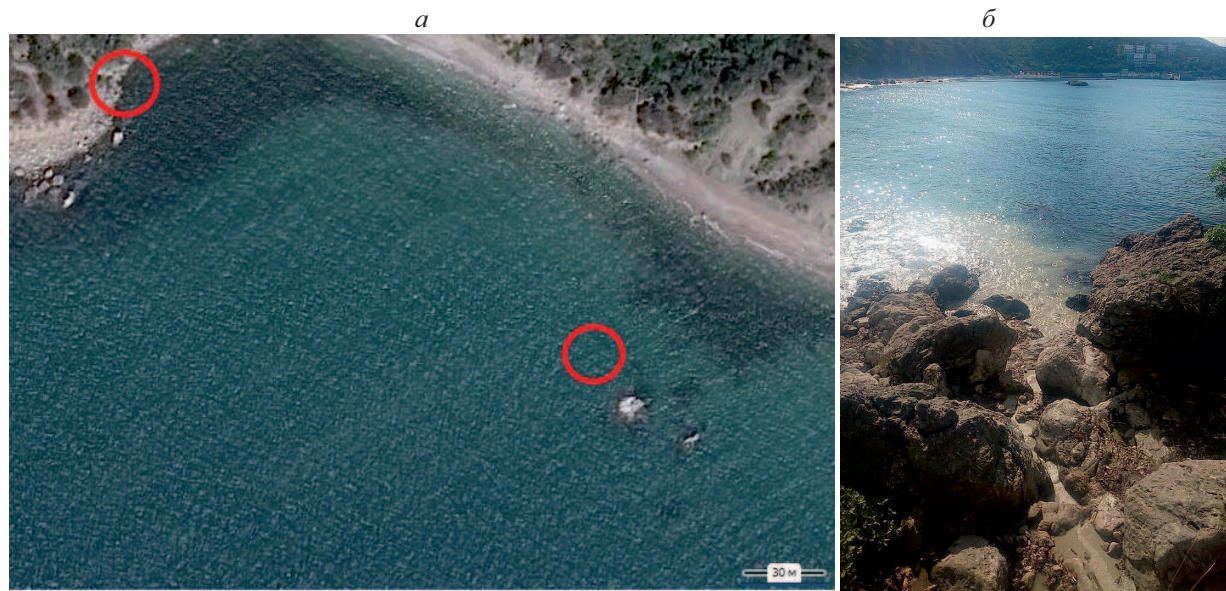


Рис. 1: *а* — Полигон измерений на спутниковом фото. Слева отмечено устье ручья, справа отмечено местоположение исследуемого сипа. *б* — Вынос мутной пресной воды в бухту

солёности и температуры воды.

На рис. 1 приведена спутниковая фотография бухты Ласпи с отмеченным местом проведения измерений (действующая площадка метановых газовыделений) и областью выхода ручья, активного в период выпадения осадков.

Измерения выполнялись в летний период при различных погодных условиях (2016 г. — безветренная, сухая погода, 2018 г. — ветер около 3 м/с, выпавшие осадки). Для получения временных распределений параметров морской воды (температуры, мутности, электропроводности, содержания кислорода) в районе площадки метановых газовыделений проводились серии измерений (от нескольких часов до суток) в непосредственной близости от места выхода пузырьковой струи, расположенного на глубине 2 м. Прибор устанавливался рядом с пузырьковой струей на штативе (рис. 2).

2. ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ ВОДЫ В АВГУСТЕ 2016 г.

В первый день измерения проводились с 14:00 до 18:00 часов по местному времени в жаркую, безветренную, сухую погоду (рис. 3, *а, б*).

В начале измерений наблюдается небольшой рост значений T и O_2 , затем идет уменьшение показателей, завершающееся увеличением этих параметров в районе 16:00 часов с последующим выходом на стационарное значение. Значения мутности также испытывают всплески в моменты пиковых значений T и O_2 . Соленость во время измерения практически не изменяется. Коэффициент корреляции для T и O_2 составляет 0.95, для O_2 и Tu — 0.3, что говорит о сильной связан-

ности процессов, влияющих на изменение показателей T и O_2 и небольшой положительной корреляции этих процессов с изменением мутности.

На следующий день была выполнена более длительная серия измерений с 8:00 часов утра до 19:00 часов вечера по местному времени (рис. 4, *а, б*).

Из приведенных данных видно, что мутность и солёность на протяжении измерений практически не изменяются, испытывая незначительные вариации. Температура воды равномерно увеличивается до 17:00 часов дня, затем уменьшается, что соответствует дневному прогреву. Содержание растворенного кислорода испытывает положительный тренд, на который накладываются небольшие всплески. Коэффициент корреляции для T и O_2 составил 0.64, для Tu и S — 0.42.

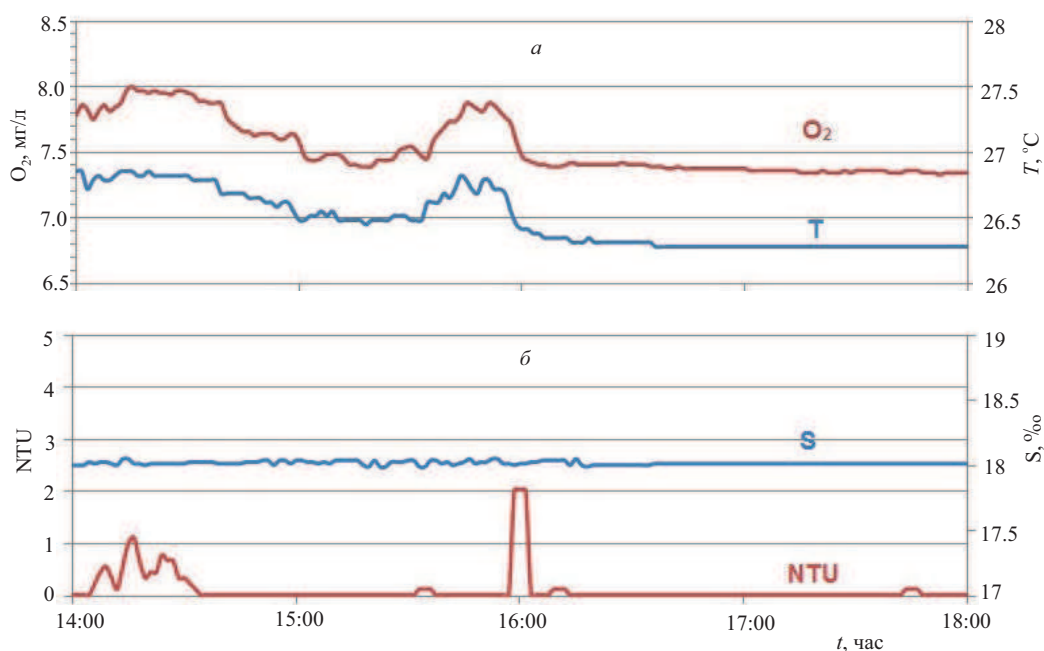
3. ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ ВОДЫ В ИЮЛЕ 2018 г.

Замеры параметров морской воды вблизи мутьевого стока, ставшего активным после выпадения осадков, были проведены на следующий день после дождя 24 июля 2018 г. Для определения влияния стока на распределение в бухте значений температуры T , содержания растворенного кислорода O_2 , солёности S и мутности Tu был сделан разрез с шагом 6 м начиная от устья ручья в сторону распространения потока. В каждой точке разреза проводилось вертикальное профилирование с шагом 0.4 м по глубине. Глубина по разрезу не превышала 1.5 м. На рис. 5 представлены распределения содержания растворенного кислорода, температуры, солёности и мутности.

Температура и солёность в устье ручья по проведен-



Рис. 2: Зонд RCM 9 LW вблизи действующего сипа

Рис. 3: Изменение температуры, концентрации растворенного кислорода (а), солёности и Tu (б) над метановым сипом в б. Ласпи в течение непрерывного эксперимента в августе 2016 г.

ным измерениям составили $T = 27^\circ\text{C}$ и $S = 0.09\%$. По мере удаления от устья ручья показатели стремятся к фоновым показателям температуры и солёности воды в бухте. Показания мутности остаются высокими вдоль всей береговой линии в направлении по часовой стрелке от устья. Мутьевой поток не опускается на дно, самые высокие концентрации наблюдаются в средних и верхних слоях толщи воды. В то же время

осолонение и охлаждение поступающей воды из ручья происходит достаточно быстро — на расстоянии 12 м от устья показатели солёности достигают фоновых значений в бухте и далее не меняются.

В тот же день были измерены параметры морской воды над сипом с 12:30 до 19:15 часов по местному времени, и из экспериментальных данных получены временные зависимости температуры, солёности, мутно-

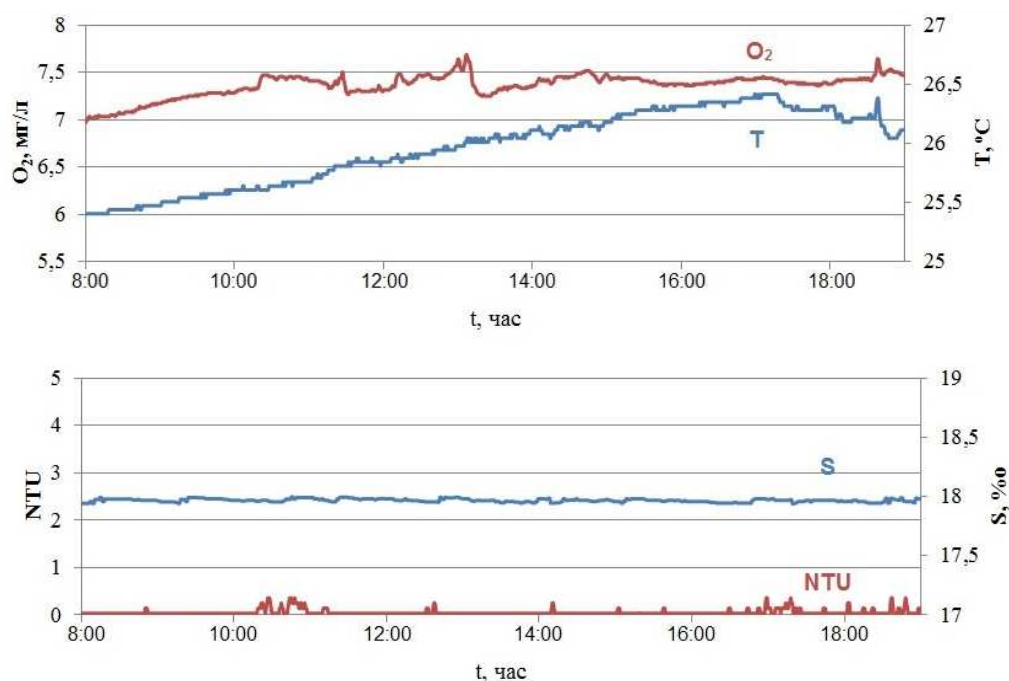


Рис. 4: Изменение температуры, концентрации растворенного кислорода (а), солёности и Tu (б) над метановым сипом в б. Ласпи в течение непрерывного эксперимента в августе 2016 г.

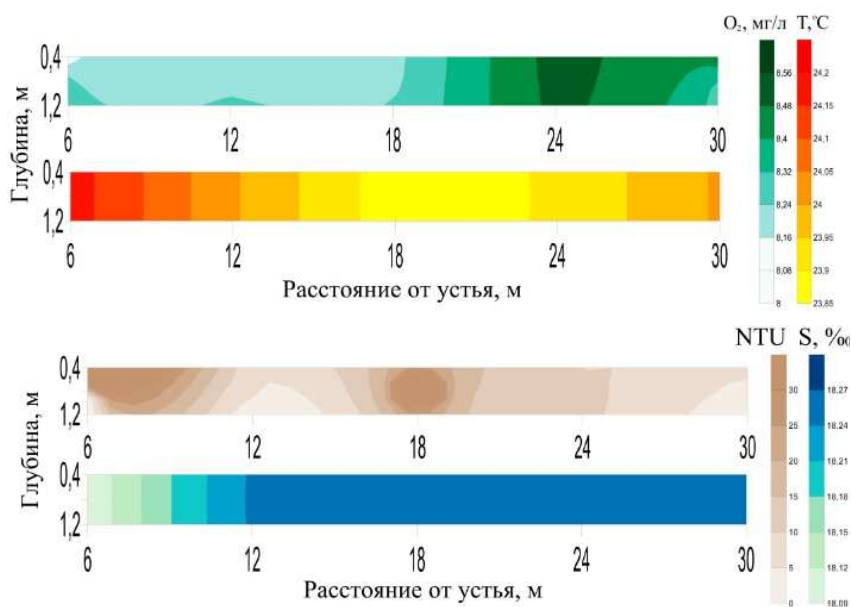


Рис. 5: Графики распределений содержания растворенного кислорода и температуры (а), солёности и мутности (б)

сти и содержания кислорода (рис. 6). Во время измерений скорость ветра составляла около 3 м/с, направление преимущественно юго-западное, без осадков.

Как видно из приведенных графиков, температура воды над сипом незначительно увеличивалась в ходе суточного прогрева, солёность практически не изменялась, а кислород и мутность в начале постепенно увеличивались, затем в 15:00 наблюдался существенный

всплеск и возврат к исходным значениям.

В ночной период измерения проводились 15 часов с 20:00 до 11:00 по местному времени (рис. 7). Скорость ветра составляла около 5 м/с, направление преимущественно юго-западное, без осадков. Начиная с 21:00 наблюдалось усиление волнения.

Солёность и температура изменяются незначительно, кислород и мутность изменяются скачкообразно

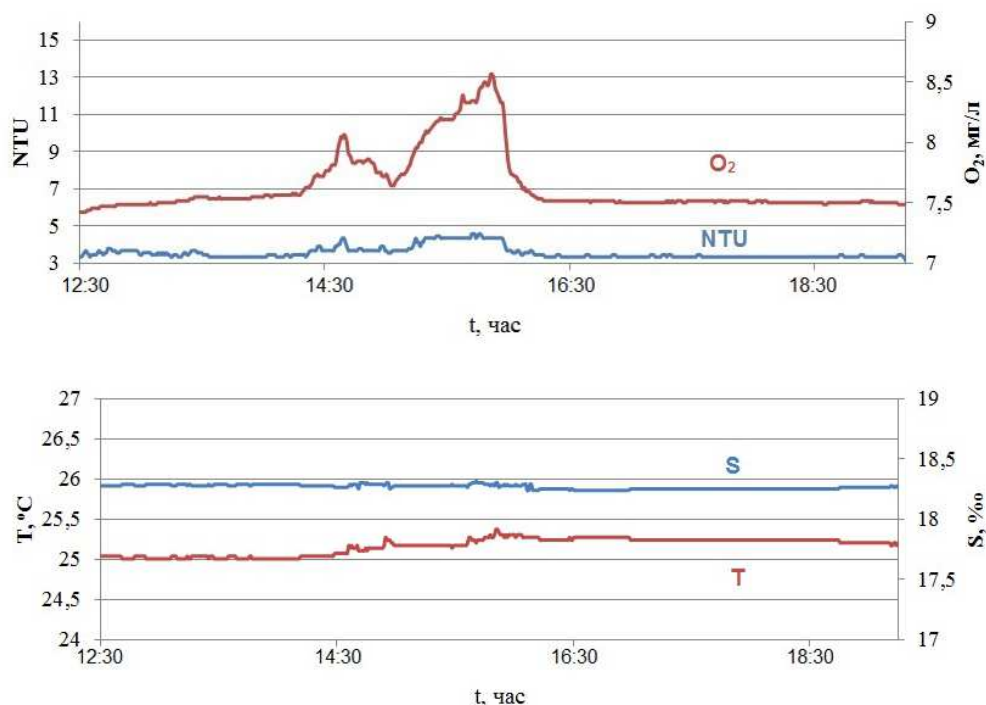


Рис. 6: Изменение температуры, концентрации растворенного кислорода, солёности и Tu над метановым сипом в б.Ласпи в течение непрерывного эксперимента в июле 2018 г. Дневной период

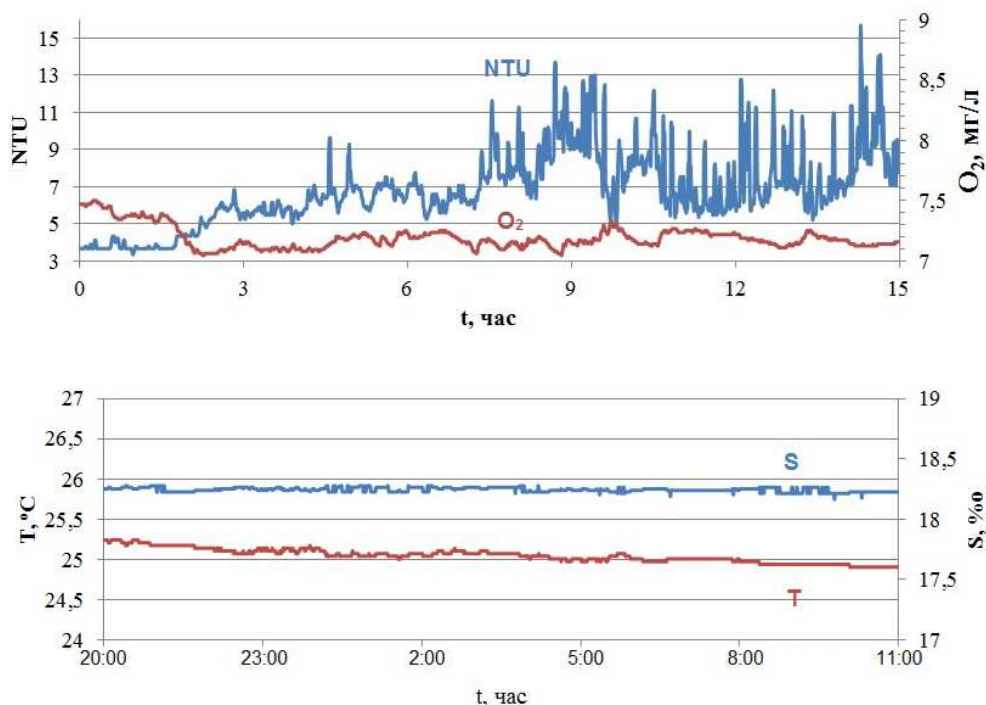


Рис. 7: Изменение температуры, концентрации растворенного кислорода, солёности и Tu над метановым сипом в б.Ласпи в течение непрерывного эксперимента в июле 2018 г. Ночной период

с большой частотой. Скачкообразные вариации мутности и содержания кислорода могут говорить о сильном

влиянии волнения на придонный слой воды и отсутствии перемешивания с верхним слоем, граничащим



Рис. 8: Направление прибрежной циркуляции в бухте Ласпи

с атмосферой. Волновые явления вызывают периодические выбросы со дна более насыщенной кислородом воды на уровень расположения датчиков измерительного зонда, что хорошо видно на приведенных графиках. При этом можно сказать, что субмаринной разгрузки вод не происходит, поскольку, несмотря на подъем и перемешивание низколежащих слоев, соленость на горизонте расположения датчиков зонда не меняется.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный мониторинг температуры, солености, мутности и содержания растворенного кислорода показывает, что на распределение параметров в толще над действующим сипом в бухте Ласпи самое большое влияние оказывает волнение, перемешивающее придонный слой.

Также в летний период у дна ощущается суточный прогрев, вызывающий вариации температуры. Показатели солености не испытывали во время всего периода наблюдений каких-либо существенных изменений вне зависимости от погоды, волнения и наличия берегового стока.

Сам береговой сток в период своей активности в первую очередь оказывает влияние на концентрацию взвешенных веществ вдоль береговой линии бухты, распространяя свое влияние в область расположения площадки метановых выделений. В то время как на соленость и температуру в точке измерений над действующим сипом влияния не оказывает.

Помимо погодных трендов параметров, в точке измерений наблюдались скачкообразные всплески концентрации кислорода и мутности, вызванные, возможно, периодической прибрежной циркуляцией воды в бухте

Ласпи, направленной вдоль берега по часовой стрелке (рис. 8), под действием которой воды из берегового стока переносятся к площадке метановых выделений. Нельзя исключать и других внешних причин, одной из которых может оказаться влияние струйных выделений метана, что требует дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты:

1. В районе площадки метановых газовых выделений в бухте Ласпи наиболее сильное влияние на параметры морской воды оказывает волнение.
2. При наличии сильного волнения больше всего изменяются показатели мутности и содержания растворенного кислорода.
3. В летний период суточный прогрев детектируется у самого дна (глубина 2 м).
4. В зоне действующего сипа наблюдаются скачкообразные изменения значений содержания растворенного кислорода и мутности, длящиеся от получаса до часа.
5. Береговые выносы не оказывают существенного влияния на температуру, соленость и содержание растворенного кислорода в зоне действия сипа, но вносят большое количество различного рода примесей, оказывающих длительное воздействие на прозрачность воды.

Работа подготовлена по теме государственного задания ФГБУН ИМБИ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (номер

гос. регистрации АААА-А18-118020890090-2) и гранта РФФИ № 18-45-920057 p_a.".

- [1] Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Гулин С.Б., Артемов Ю.Г., Стокозов Н.А., Костова С.К. // Морской экологический журнал. 2003. **2**, № 3. С. 5.
- [2] Артемов Ю.Г. Распределение и потоки метановых струйных газовыделений в Черном море. Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского. Севастополь, 2014. С. 20.

- [3] Malakhova T. V., Kanapatskii T. A., Egorov V. N., Malakhova L. V., Artemov Yu. G., Evtushenko D. B., Gulin S. B., Pimenov N. V. // Microbiology. 2015. **84**, N 6. P. 838.

Measurement hydrological parameters of water over methane SIP in Laspi Bay during continuous in situ experiments

A. A. Budnikov^{1,a}, I. N. Ivanova^{1,b}, T. V. Malakhova^{2,c}, E. V. Kirillov¹

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

²The A. O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS
Sevastopol, 299011, Russia

E-mail: ^aaa.budnikov@physics.msu.ru, ^bivair@yandex.ru, ^ct.malakhova@imbr-ras.ru

The paper discusses the hydrological sea water parameters on methane sipe in the Laspi bay. It is shown that the main influence on the parameters is exerted by the wave, in which the turbidity of water and the content of dissolved oxygen change most significantly. Abrupt changes in the values of Tu and O₂, lasting from half an hour to an hour, were found. It was detected that coastal removals do not affect the temperature, salinity and dissolved oxygen content in the range of the SIP.

PACS: 92.05.Hj, 92.10.Lq, 92.60.Ek.

Keywords: methane sip, dissolved oxygen, jet methane emissions, transport of impurities.

Received 29 June 2019.

Сведения об авторах

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