

УДК 551.465

ПОСТУПЛЕНИЕ СТРУЙНОГО МЕТАНА В АНОКСИЧЕСКИЕ ВОДЫ ЧЕРНОМОРСКОЙ ВПАДИНЫ

© 2019 г. Ю. Г. Артёмов*, В. Н. Егоров, С. Б. Гулин

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: yu.g.artemov@gmail.com*

Поступила в редакцию 20.03.2018 г.

После доработки 29.04.2019 г.

Принята к публикации 18.06.2019 г.

На основе многолетних данных о пространственном распределении и потоках струйного метана в Черном море рассматриваются различные типы струйных газовыделений, вносящих вклад в содержание метана в аноксической зоне Черного моря. Оценка годового поступления метана струйных газовыделений в бюджет метана в Черном море составила $1.2 \cdot 10^9$ м³, или 0.9 Тг, что существенно меньше оценок, полученных биогеохимическими методами (2.30–5.65 Тг год⁻¹).

Ключевые слова: Черное море, струйные газовыделения, баланс метана

DOI: 10.31857/S0030-1574596952-963

Черное море, относительно замкнутый бассейн с площадью водного зеркала 423 000 км², максимальной глубиной 2212 м и объемом 547 015 км³, является крупнейшим на планете анаэробным водоемом [5] и крупнейшим резервуаром растворенного метана [7]. В условиях устойчивой стратификации водной толщи и слабом перемешивании поверхностных и глубинных вод, под расположенным на глубинах более 100 м слоем пикноклина в Черном море сформировалась обширная бескислородная зона [16] с чрезвычайно высоким содержанием растворенного метана. Так, концентрация метана в поверхностном слое Черного моря составляет 1–10 наномоль л⁻¹, возрастая на глубинах свыше 600 м более чем в 1000 раз — до 11–12 мкмоль л⁻¹ [14].

Согласно известным представлениям, общее содержание и вертикальное распределение метана в водах Черного моря сохраняется квазистационарным, по крайней мере на протяжении 30-летнего периода наблюдений, а между поступлением и потреблением метана существует устойчивый баланс [22].

Как известно, в природе метан образуется в основном в результате биологического распада биомассы, который происходит строго в анаэробных условиях и зависит от наличия лабильного органического материала, а также тем-

пературы [24]. Еще сравнительно недавно при рассмотрении бюджета метана в Черном море основным механизмом поступления метана в водный столб считались диагенетические процессы в донных отложениях [19].

Однако в 1989 г. было открыто явление метановых струйных газовыделений (метановых сипов) в аноксической зоне Черного моря [8] и подтвержден значительный масштаб его распространения [3]. Кроме того, было показано, что почти 100% выделившегося на аноксических глубинах свободного (пузырькового) метана растворяется при всплытии, не достигнув поверхности моря [10]. В связи с этим вопросы, связанные с бюджетом метана в Черном море, вновь попали в фокус внимания различных групп исследователей.

Так, в работе [15] основным источником поступления и основным потребителем метана рассматриваются метаногенез (10.1 Тг год⁻¹) и микробное окисление метана (12.4 Тг год⁻¹) в водной толще соответственно. Вместе с тем продукция ($4.5 \cdot 10^{-3}$ Тг год⁻¹) и потребление ($4.0 \cdot 10^{-3}$ Тг год⁻¹) метана в донных осадках значительно меньше по порядку величин и почти полностью компенсируют друг друга. А поскольку потребление метана в водном столбе лишь частично перекрывается его микробным

образованием, авторы подсчитали, что дисбаланс в метановом цикле Черного моря компенсируется за счет дополнительного источника поступления метана — струйных газовыделений из холодных (биогенных) сипов и грязевых вулканов, вклад которого оценивается суммарно величиной 2.3 Тг год⁻¹ (рис. 1).

По данным другой группы исследователей [17], потребление метана в Черном море составляет 4.7 Тг год⁻¹, причем микробный метаногенез в водах с высоким содержанием сероводорода почти полностью подавляется процессом сульфатредукции, поэтому в Черном море существуют лишь два значимых источника поступления метана. Главные из них — струйные газовыделения и дестабилизированные газидраты — вносят в водную толщу Черного моря 3.60–5.65 Тг год⁻¹, а продукция метаногенов в донных осадках шельфа и материкового склона оценивается как второстепенный источник метана в Черном море с существенно меньшим вкладом — до 0.35 Тг год⁻¹.

Цель нашей работы состоит в оценке скорости и объема поступления струйного метана в водную толщу Черного моря на основе материалов исследований, проводившихся в Отделе радиационной и химической биологии (ОРХБ) ИМБИ РАН им. А.О. Ковалевского (ранее — ИнБЮМ) в период 1991–2012 гг.

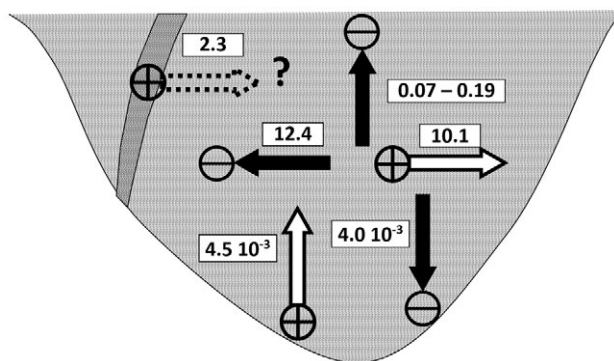


Рис. 1. Бюджет метана в Черном море в Тг год⁻¹, 1 Тг ≈ 14.710⁸ м³ [15]. Символически обозначены источники (со знаком “+”) и потребители (со знаком “-“) метана, согласно пояснениям в тексте. Содержание растворенного метана в анаэробной зоне: 72.2 Тг (1 Тг = 10¹² г).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Особенности пространственного распределения газовых сипов и потоков струйного метана были исследованы в 18 научных рейсах, в том числе 12 международных (рис. 2).

Исследования включали в себя три этапа:

- 1) детектирование сипов;
- 2) локализацию сипов;
- 3) оценку потока струйного метана.

В ходе исследований выполнялись гидроакустические наблюдения с использованием

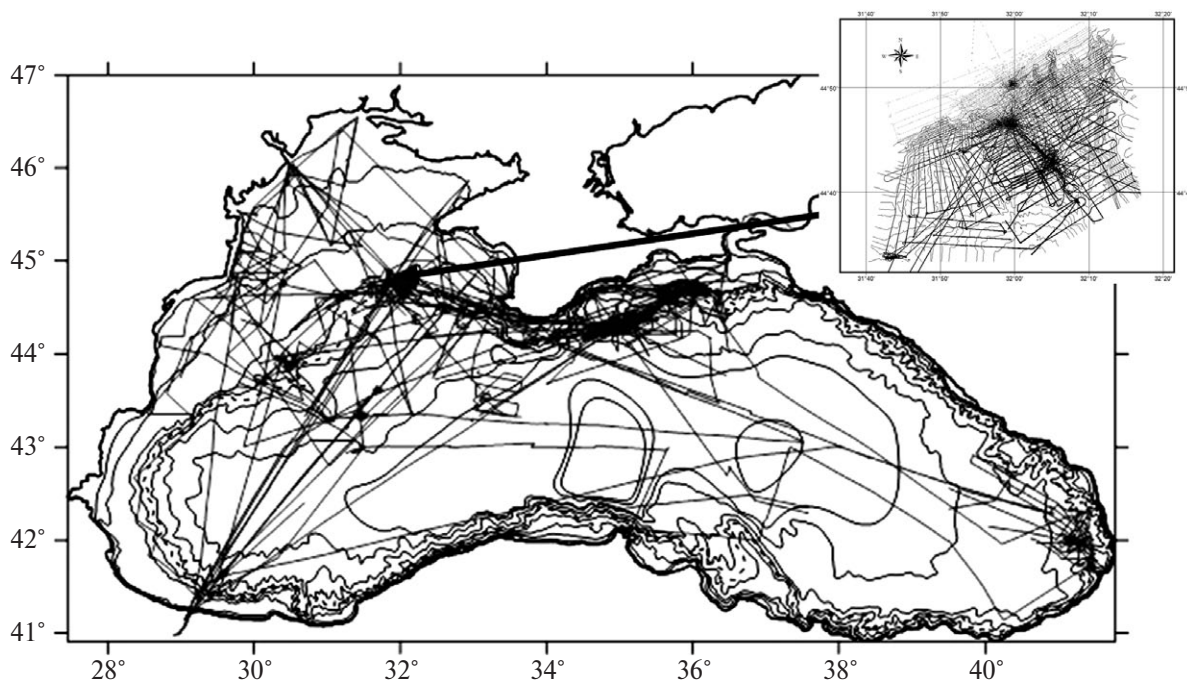


Рис. 2. Маршруты экспедиций ОРХБ в Черное море, начиная с 1995 г. На врезке показана карта галсов в районе палеорула р. Днепра, выполненных на борту НИС “Профессор Водяницкий” в 2003–2004 гг.

калиброванного эхолота с расщепленным лучом, а также параметрических и многолучевых акустических систем. Кроме того, проводились визуальные наблюдения природных струйных газовыделений с помощью обитаемого исследовательского аппарата Jago и необитаемого роботизированного комплекса QUEST-4000 с борта научно-исследовательских судов “Посейдон” и “Метеор” (оба судна принадлежат Германии).

Более детально методики наблюдений и обработки данных описаны в работах [4, 10].

Всего было зарегистрировано 5197 метановых газовых факелов в диапазоне глубин от 14 до 2100 м, по которым однозначно идентифицирована 4381 площадка газовой разгрузки дна в Черном море (рис. 3).

Анализ обширного статистического объема данных позволил установить основные закономерности локализации и активности струйных выходов метана из дна Черного моря:

1. Абсолютное большинство струйных метановых газовыделений в Черном море приурочено к палеодельтам крупных рек и континентальному склону, пространственно совпадая на многих участках с геодинамическими зонами.

2. Свыше 98% газовыделений расположено выше фазовой границы стабильности метановых гидратов в Черном море (725 м). В глубоководной части Черного моря струйные газовыделения привязаны в основном к районам активного развития грязевого вулканизма и диапиризма.

3. Водная толща является эффективным фильтром струйного метана и почти весь метан струйных газовыделений (не менее 98.7%) полностью растворяется, а углерод метана вносится в биогеохимические циклы и биолого-продукционные процессы Черного моря.

Наиболее подробно за все годы исследования был изучен район палеоруслы р. Днепра (врезка на рис. 2), где на площади 345 км² было зарегистрировано 1295 сипов в диапазоне глубин 141.4 м–725.5 м. Для каждого из 1295 сипов были получены оценки потока эмиссии струйного метана из морского дна Φ_0 (л мин⁻¹ при нормальных условиях, STP), составившие в сумме около 30.0 м³ мин⁻¹ [10]. Сводка данных, полученных в районе палеоруслы р. Днепра приведена в табл. 1.

Согласно результатам исследований, данный район может рассматриваться как один из наиболее активных районов метанопроявлений,

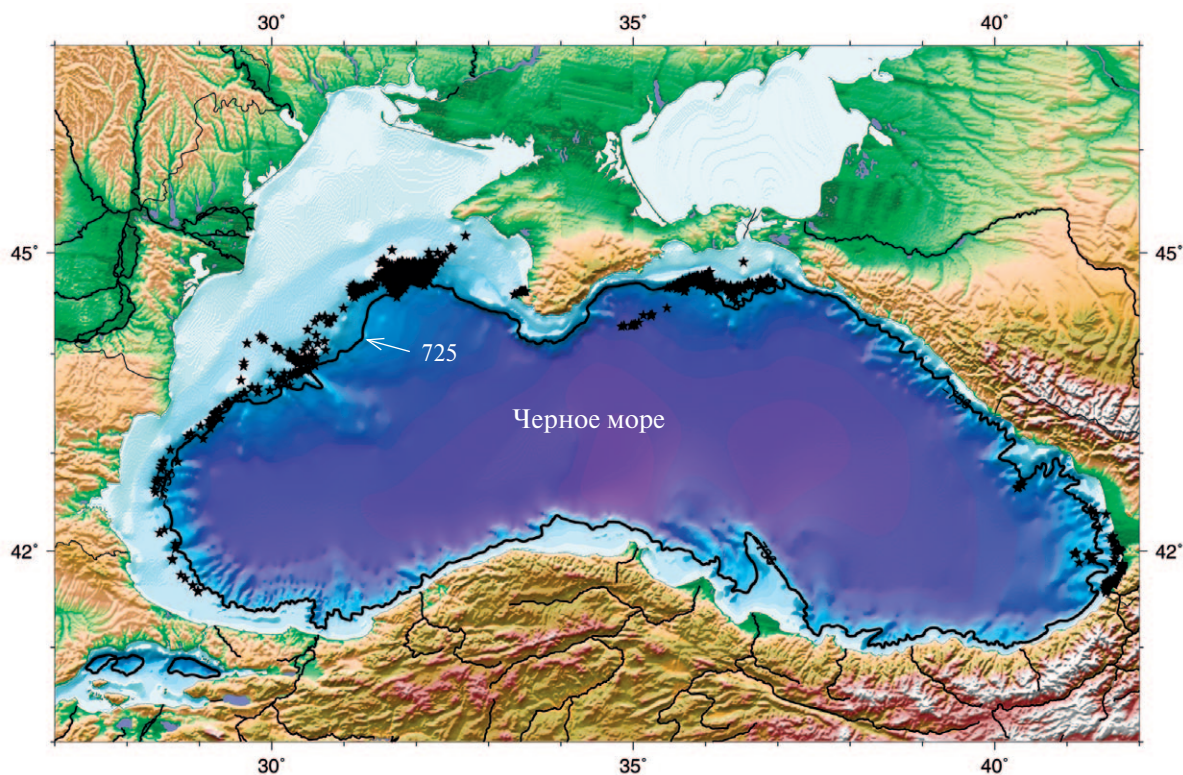


Рис. 3. Распределение метановых сипов в Черном море (локализация сипов изображена пентаграммами). Линией отмечена изобата 725 м. По материалам [4].

Таблица 1. Параметры эмиссии струйного метана в районе палеоруслла р. Днепра

Параметр	Глубина 140–725 м
Обследованная площадь, км ²	345
Количество сипов	1295
Оценка пространственной плотности распределения сипов, км ⁻²	3.75
Оценка общего потока эмиссии струйного метана $\sum \Phi_0$, м ³ мин ⁻¹	29.6
Оценка пространственной плотности потока эмиссии метана F_p , 10 ⁴ м ³ км ⁻² год ⁻¹ STP	4.5

являясь частью обширного конуса выноса, аккумулирующего огромные массы органического материала со всей северо-западной части Черного моря с прилегающими реками. Причем в аноксическую толщу вод Черного моря струйный метан эмитируют в основном сипы, расположенные ниже верхней границы пикноклина (140 м) и выше верхней границы зоны стабильности газогидратов (725 м). Струйные газовыделения кислородной зоны значительную часть свободного метана выносят в атмосферу, а растворившийся по мере подъема газовых пузырьков метан с большей вероятностью мигрирует к поверхности моря, нежели преодолевает градиент плотности в пикноклине и проникает в анаэробную зону с более высокой концентрацией растворенного метана. С другой стороны, в зоне стабильности газогидратов в этом районе обнаружены лишь три газовыделяющие площадки на глубине 800 м, что по сравнению с количеством сипов в табл. 1 является существенно меньшей величиной (рис. 4).

Для получения оценки потока эмиссии струйного метана в масштабах всего Черного моря данные табл. 1 были экстраполированы на другие участки континентального склона.

Для оценки пространственной протяженности этих участков из файла цифровой модели рельефа морского дна с размером ячейки 30 дуговых секунд **gebco_08.grd**, свободно распространяемого в рамках Программы GEBCO (GEneral Bathymetric Chart of the Oceans), были выделены с помощью программы GMT V. 5.1.1 изобаты 140 и 725 м для Черного моря и нанесены на карту, отображаемую программой OziExplorer V3.95.6f. Обе изобаты представляют собой связанные замкнутые кривые, ограничивающие участки континентального склона Черного моря, расположенные в аноксической зоне (рис. 5).

Ограниченный изобатами 140 и 725 м материковый склон был разбит на участки по географическому принципу, где наличие активных струйных газопроявлений подтверждалось либо сделанными ранее наблюдениями (рис. 3), либо известными литературными данными: например, о существовании выходов струйного метана на востоке российского сектора указывают данные исследований [6]. В турецкой зоне были зафиксированы многочисленные прямые и косвенные свидетельства о наличии площадок газовой разгрузки дна моря [12, 13, 20]. Вместе с тем акватория, прилегающая к юго-западной оконечности Крыма, была исключена из рассмотрения, поскольку здесь в указанном диапазоне глубин не было обнаружено ни единого газового факела, причем тотальное обследование континентального склона и котловины Черного моря в районе Ломоносовского массива и прилегающих участков были проведены в 2007 г. с использованием многолучевого эхолота [2].

Для активных газовыделяющих участков в масштабах всего Черного моря поток метана

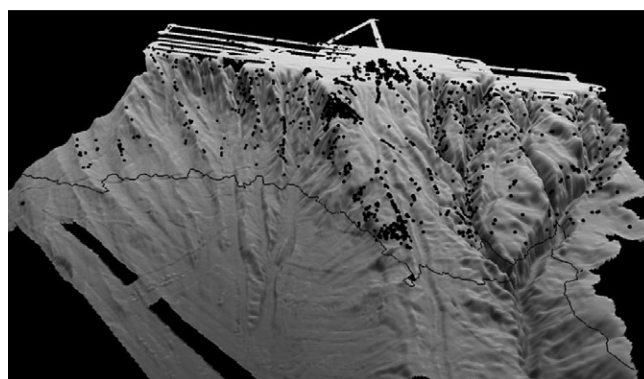


Рис. 4. Струйные газовыделения (черные точки) на батиметрической карте морского дна в районе палеодельты р. Днепр-Каланчак. Линия проведена по изобате 725 м. В левой части карты различимы метановые сипы, расположенные в зоне стабильности газогидратов. По материалам [4].

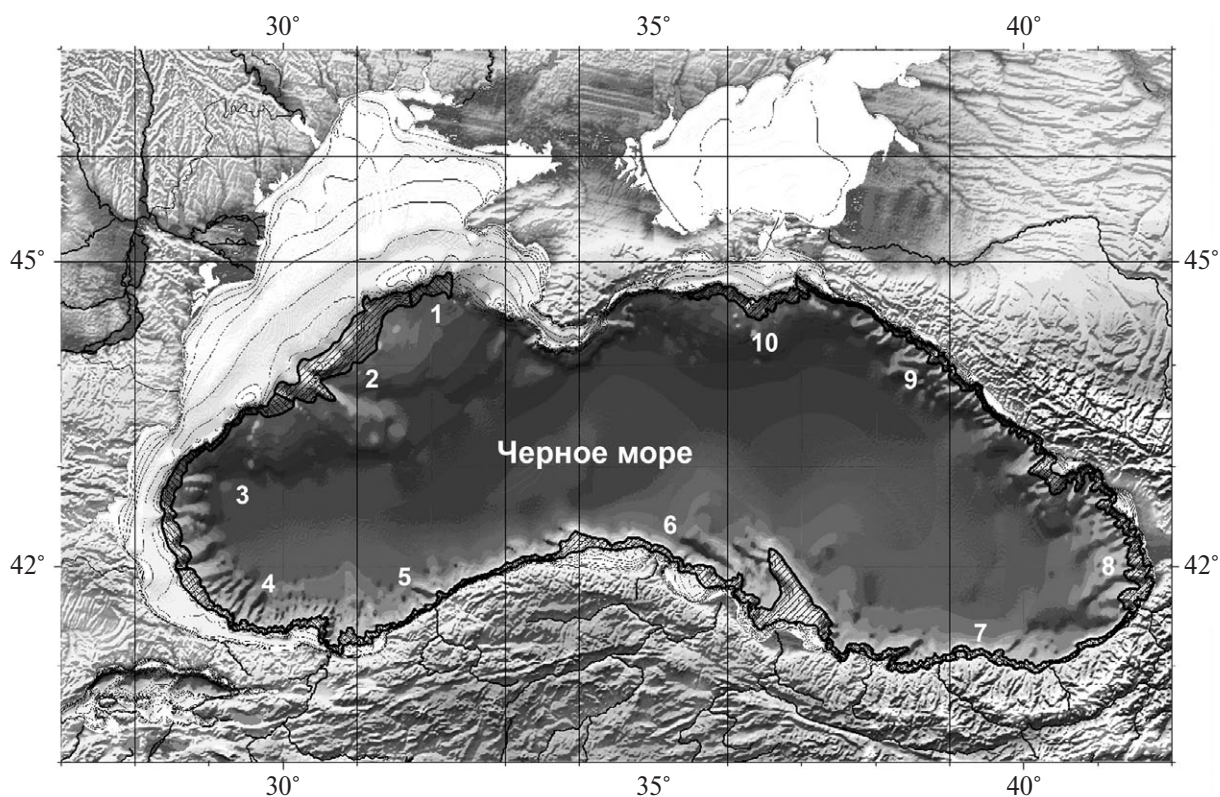


Рис. 5. Основные районы активных газопроявлений, эмитирующих метан в аноксическую зону Черного моря. Цифрами обозначены районы: 1 — Северо-северо-запад (палео-Днепр), 2 — Румынский сектор (палео-Дунай), 3 — Болгарский сектор, 4 — Запад турецкого сектора, 5 — Прибосфорский район, 6 — Центр турецкого сектора, 7 — Восток турецкого сектора, 8 — Грузинский сектор, 9 — Восток российского сектора, 10 — Северо-северо-восток (палео-Дон).

полагался пропорциональным площади участка и оценке пространственной плотности потока струйного метана, сделанной для обширной области континентального склона в районе палеорула р. Днепра (табл. 1).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценки потока для каждого из выделенных участков материкового склона приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оценки потока струйного метана в аноксической зоне Черного моря на различных участках материкового склона

№	Район	Площадь (км ²)	Поток метана (м ³ год ⁻¹ 10 ⁶)
1	Северо-северо-запад (палео-Днепр)	739	33.3
2	Румынский сектор (палео-Дунай)	5180	233.6
3	Болгарский сектор	2812	126.8
4	Запад турецкого сектора	1004	45.3
5	Прибосфорский район	2326	104.9
6	Центр турецкого сектора	5917	266.9
7	Восток турецкого сектора	2532	114.2
8	Грузинский сектор	3911	176.4
9	Восток российского сектора	1663	75.0
10	Северо-северо-восток (палео-Дон)	1655	74.6
	ВСЕГО	31373	1251.0

Согласно табл. 2, от метановых сипов в воды Черного моря поступает ежегодно порядка $1.2 \cdot 10^9$ м³ метана. В весовых единицах эта величина соответствует 0.9 Тг год⁻¹ (1 Тераграмм Тг = 10^{12} грамм), что существенно меньше известных оценок вклада холодных сипов и грязевых вулканов в баланс метана в Черном море [15, 17].

Поскольку выполненные расчеты основывались на экстраполяции параметров газоотдачи метановых сипов в районе русла палео-Днепра, где зафиксирована наивысшая плотность пространственного распределения сипов среди других ранее изученных районов, имеется основание полагать, что рассчитанный поток метана от сипов, расположенных на континентальном склоне в диапазоне глубин 140–725, в масштабах всего Черного моря близок к максимальной оценке.

С другой стороны, необходимо дополнить полученную оценку возможным вкладом в общую эмиссию сипов, расположенных в зоне стабильности газогидратов. Как уже упоминалось в тексте выше, такие сипы встречаются преимущественно там, где существуют мощные тепловые потоки, создающие условия для проявления струйно-пузырьковой эмиссии метана в зоне стабильности газогидратов — в районах развития диапиризма и грязевого вулканизма. Согласно [9], пространственное распределение таких районов в Черном море имеет локальный характер.

Так, на востоке Черного моря в структуре олигоцен-четвертичной толщи выделяют антиклинали Рионо-Трабзонской зоны, хорошо выраженные в четвертичных отложениях [9], а также и в рельефе дна, что указывает на активный их рост вплоть до настоящего времени (рис. 6).

В 2007 г. в средней части подводного хребта на глубинах 850–900 м были обнаружены три участка активных струйных газовыделений и исследованы с применением локаторов бокового обзора [11, 18]. Наибольший участок, получивший название “Батуми” (рис. 6), имел площадь 0.5 км² и включал в себя 15 пространственно разделенных сипов; 2-й, названный “Кобулет”, имел площадь 0.07 км² и насчитывал 24 сипа, а 3-й, “Поти”, содержал лишь 3 сипа на площади 0.05 км². Кроме того, газовые факелы были обнаружены в диапазоне глубин 1000–1200 м на вершинах подводных гор “Иберия”, “Кол-

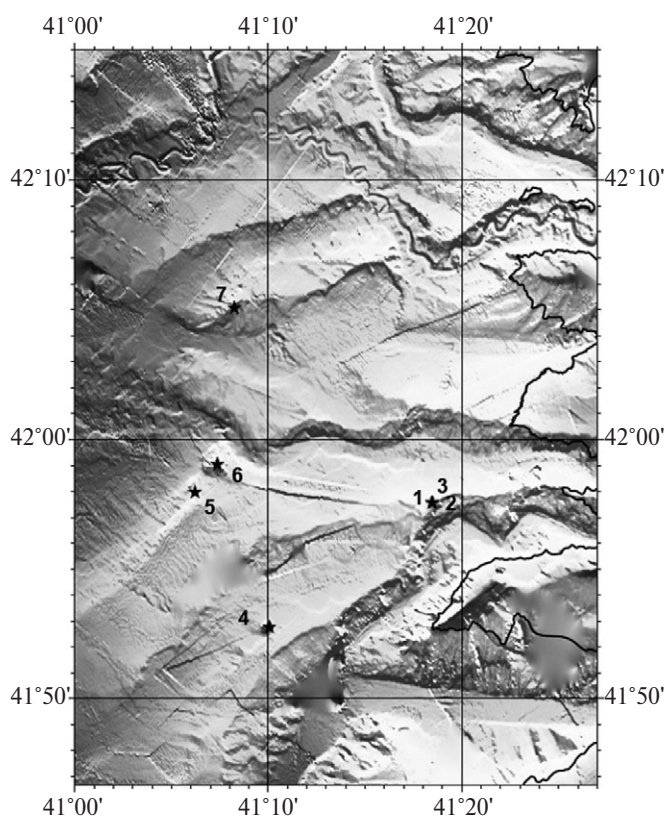


Рис. 6. Батиметрическая карта участка грузинского сектора Черного моря. Линией показана изобата 725 м. Маркерами в виде пентаграмм и цифрами обозначены обнаруженные участки струйных газовыделений: 1 — “Батуми”, 2 — “Кобулет”, 3 — “Поти”, 4 — “Иберия”, 5 — “Колхети”, 6 — “Печори” и 7 — “НОС”.

хети”, “Печори” и “НОС” (рис. 6). Нельзя исключать, что в грузинском секторе Черного моря в последнее время были обнаружены дополнительные участки струйной разгрузки метана на аноксических глубинах, однако это не меняет характеристику пространственного распределения этой категории метановых сипов как локальные.

В рассматриваемом районе были выполнены единичные измерения интенсивности газовыделений с использованием подводного роботизированного комплекса Quest-4000 (Германия), в частности на участке “Батуми” [11]. Прямые измерения газового потока с помощью проградуированной прозрачной емкости показали, что поток газовой разгрузки обследуемых сипов составляет от 0.08 до 3.5 л мин⁻¹ *in situ*, или от 0.4 до $16.0 \cdot 10^4$ м³ год⁻¹ при нормальных условиях со средним значением $8.2 \cdot 10^4$ м³ год⁻¹, и находится в пределах ранее установленного диапазона значений расхода

газа для индивидуальных газовыделений в палео-русле р. Днепра [10]. Полагая, что эмиссия струйного метана в других сипах рассматриваемого района составляет величины того же порядка, что и на участке “Батуми”, и принимая во внимание количество сипов на участках газовой разгрузки, можно определить, что общий вклад в поток эмиссии метана рассматриваемого района достигает $8.0 \cdot 10^6 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$.

Струйные газовыделения в зоне стабильности газогидратов на глубинах порядка 900 м обнаружены также в западной части конуса выноса р. Дона (рис. 7).

Группа из 8 пространственно разделенных сипов, обнаруженных на прикерченском континентальном склоне в зоне стабильности газогидратов, получила название “Керчь” [11]. Подобно участку струйной разгрузки метана “Батуми” (рис. 6), при измерении профилей температуры *in situ* в верхних слоях донных осадков в районе сипов “Керчь” регистрируется тенденция возрастания температуры с глубиной при значениях градиента, достигающих в непо-

средственной близости от сипов $0.067^\circ\text{C м}^{-1}$, в отличие от фоновых значений за пределами участков газовыделений, не превышающих $0.02^\circ\text{C м}^{-1}$ [12].

Для 4 сипов на участке “Керчь” выполнены измерения потока эмиссии струйного метана в воду и получены значения от 0.03 до 3.3 л мин^{-1} *in situ*, или от 0.2 до $18.8 \cdot 10^4 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$ со средним значением по 4 сипам $5.0 \cdot 10^4 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$. На основе этих данных можно определить, что эмиссия от всех 8 сипов на участке “Керчь” составляет порядка $0.4 \cdot 10^6 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$.

Таким образом, общий поток эмиссии струйного метана из дна в исследованных районах развития диапиризма может составить суммарно $8.4 \cdot 10^6 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$, т.е. величину, меньшую по крайней мере на 2 порядка, чем итоговая оценка, приведенная в табл. 2. Вероятно, эта величина не в полной мере отображает потенциал возникновения участков струйной разгрузки метана в Восточном и Северо-Восточном секторах Черного моря. В будущем, по мере более детального изучения этих районов, в частности,

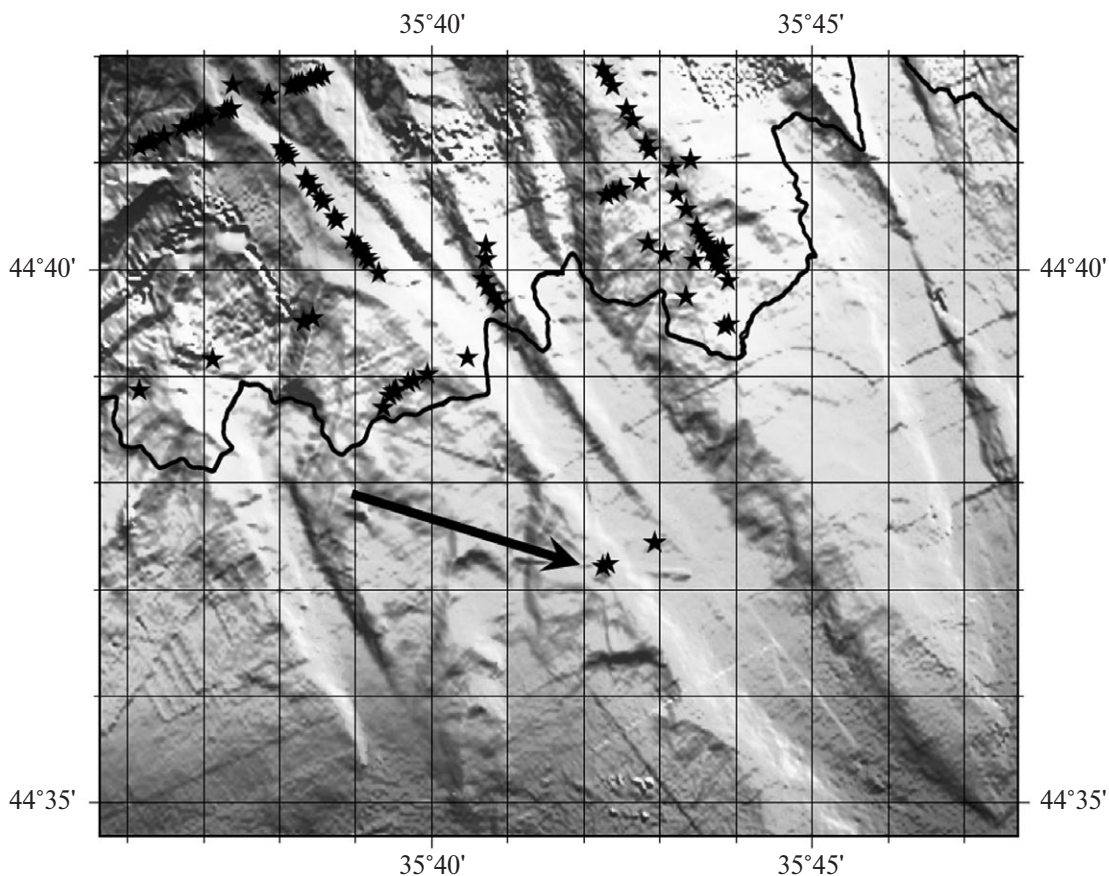


Рис. 7. Батиметрическая карта участка конуса выноса палео-русла р. Дона в Черном море. Линией показана изобата 725 м. Маркерами в виде пентаграмм обозначено положение метановых сипов. Стрелка указывает на сип “Керчь”.

с использованием многолучевых эхолотов и сонаров бокового обзора, полученная оценка будет уточняться. Однако маловероятно, что общий поток метана от этой категории сипов достигает величины суммарного потока от сипов, расположенных выше зоны стабильности газогидратов.

Кроме того, выявлено существование метановых сипов на глубинах 800–1000 м в Западном и Северо-Западном секторах Черного моря — в районах конусов выноса палео-Днепра и палео-Дуная, а также восточной окраины Мизийской плиты, известной провинции Предкарпатско-Балканского нефтегазоносного бассейна. В отличие от приведенных выше участков газовой разгрузки в диапировых складках, глубоководные струйные газовыделения на западе Черного моря весьма малочисленны и не образуют значительных потоков струйного метана, поэтому их вклад в общую эмиссию метана в настоящей статье не учитывается.

Существенно более значимым источником поступления метана в воды Черного моря рассматриваются грязевые вулканы, расположенные на абиссальных глубинах: в центральной части моря, в Сорокинском и Туапсинском прогибах. Порядка 66 глубоководных грязевых вулканов задокументировано к настоящему

времени в Черном море [6], и в большинстве обнаружены признаки геофлюидов, таких как наличие газогидратов в верхних слоях донных осадков, повышенные значения концентрации углеводородов и вертикальные потоки тепла, однако эмиссия газовых пузырьков в водный столб в виде газовых факелов над глубоководными грязевыми вулканами Черного моря наблюдалась лишь в редких случаях. Так, во впадине Сорокина в разное время обнаружено 12 активных грязевых вулканов (рис. 8).

Период наблюдений, выполненных во впадине Сорокина, охватывает 10 лет — с 2002 по 2012 гг. Некоторые вулканы оставались неактивными в течение периода наблюдений, другие периодически “выбрасывали” газовый факел, который со временем постепенно деградировал вплоть до полного исчезновения. На протяжении ряда лет наблюдалось изменение активности вулкана Двуреченский (рис. 9).

Согласно рис. 9, интенсивные газовые выбросы из вулкана Двуреченский наблюдались с разрывом примерно в 4 года и 9 месяцев — в июне 2002 г. и апреле 2007 г. В течение года после выброса интенсивность вулкана существенно ослабевала и затем медленно уменьшалась вплоть до полного затухания. Вероятно, подобным же

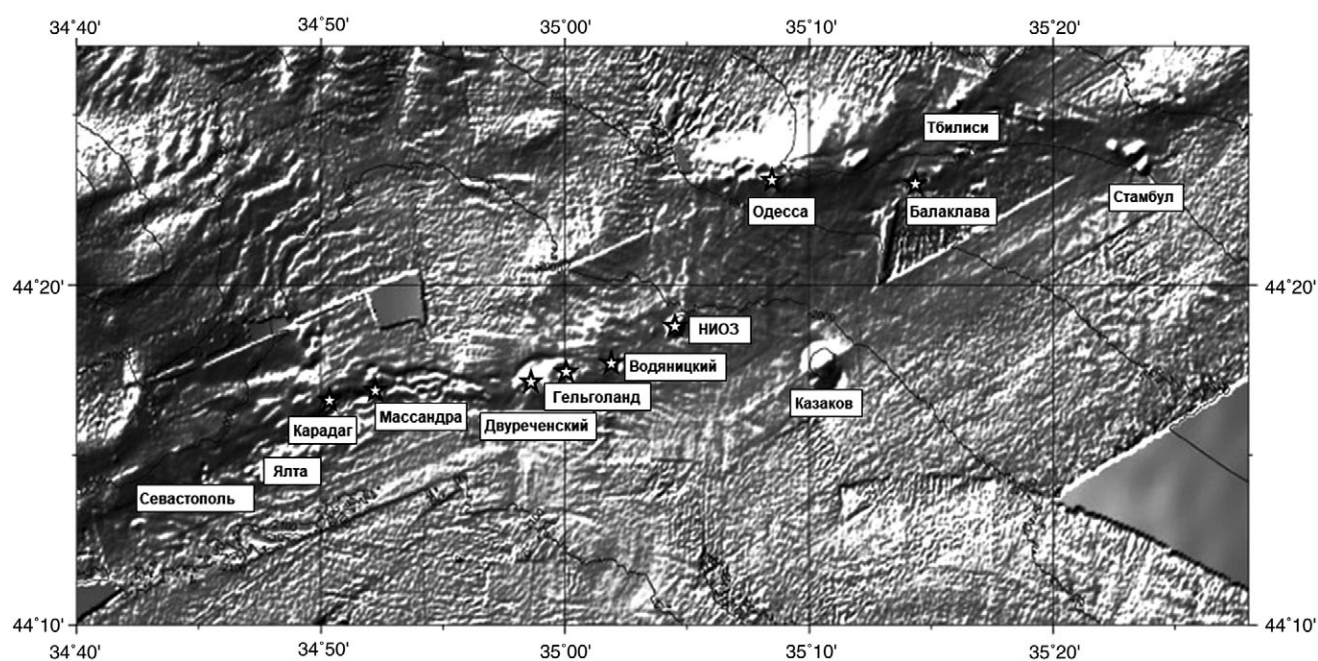


Рис. 8. Грязевые вулканы во впадине Сорокина. Маркерами в виде пентаграмм отмечены активные газовыделяющие грязевые вулканы в 2007 г. По данным [4].

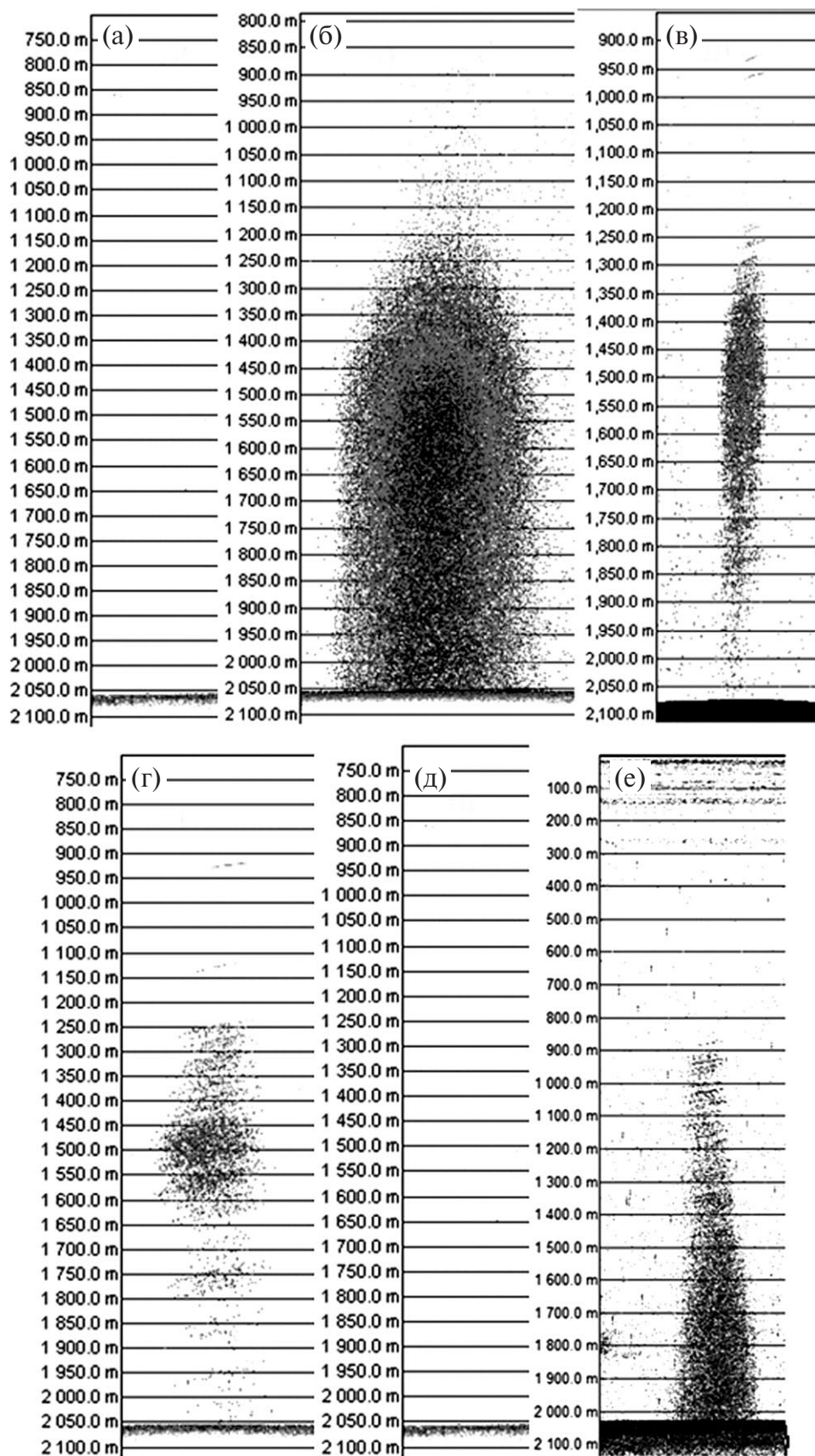


Рис. 9. Регистрация эхограмм газового факела над вулканом Двуреченский в различные годы: (а) — январь 2002 г.; (б) — июнь 2002 г.; (в) — май 2003 г.; (г) — июнь 2004 г.; (д) март 2007 г.; (е) — апрель 2007 г.

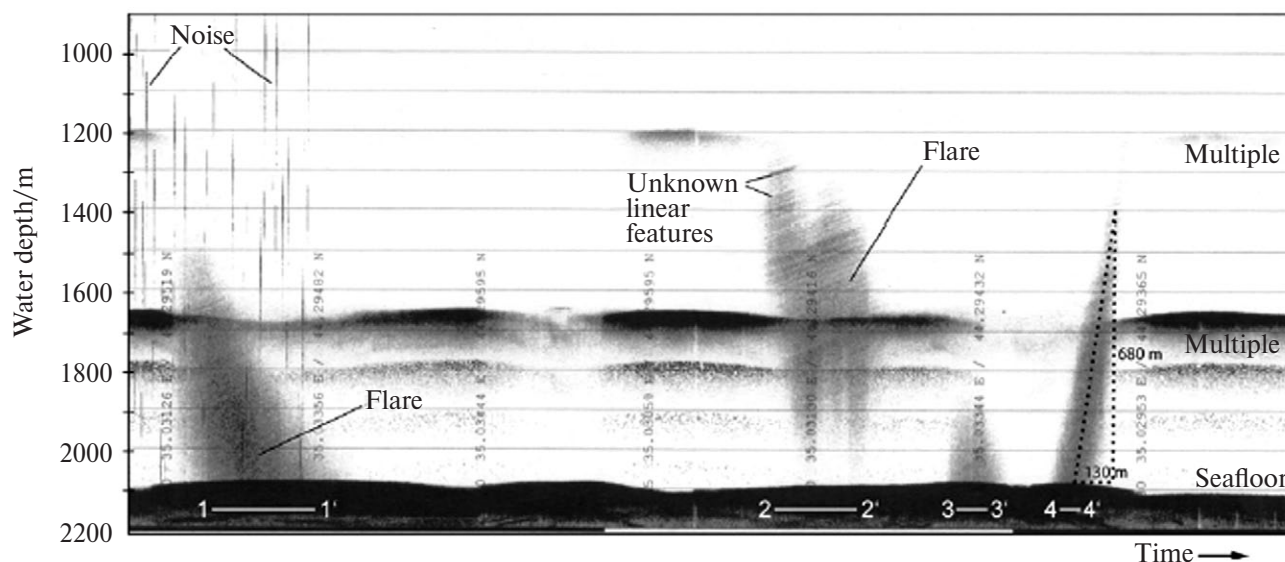


Рис. 10. Эхограммы газового факела над вулканом Водяницкий в апреле 2007 г. [21].

образом проявляется значительная временная изменчивость интенсивности других грязевых вулканов во впадине Сорокина.

Электронные эхограммы струйных газовойделений над грязевыми вулканами косвенно свидетельствуют о вариабельности потока метана в водную толщу в прогибе Сорокина. Так, по данным дистанционного акустического зондирования, сила обратного рассеяния в факеле, состоящем из выделившихся из кратера вулкана Двуреченский метановых пузырьков, менялась от -53.6 в июне 2002 г. до -69.0 дБ в мае 2003 г., т. е. почти в 34 раза. Однако разность значений потока в действительности может оказаться меньшей, поскольку точность таких оценок невелика из-за наличия резонансной составляющей в обратном акустическом сигнале.

Более точный метод, заключающийся в автоматической обработке видеозаписей автономного подводного аппарата QUEST-4000 (Германия), был применен в апреле 2007 г. для оценки потока струйного метана от грязевого вулкана Водяницкий, находящегося на расстоянии 4.6 км от вулкана Двуреченский [21].

Полученные оценки (17.0 – 55.4 л мин $^{-1}$), вероятно, близки к максимальным для грязевого вулкана Водяницкий, с учетом того, что этот вулкан находился близко к пику активного периода (рис. 10), так же как и вулкан Двуреченский (рис. 9е).

Если пренебречь данными об изменчивой активности грязевых вулканов и предположить, что активность вулкана Водяницкий сохраняется в течение года на том же уровне, что и в апреле 2007 г., то годовой вклад этого вулкана в бюджет метана в Черном море составит приблизительно 1.0 – $3.0 \cdot 10^4$ м 3 год $^{-1}$. Экстраполируя эти значения на все активные грязевые вулканы во впадине Сорокина, можно получить оценки их суммарной эмиссии 12.0 – $36.0 \cdot 10^4$ м 3 год $^{-1}$, а в масштабах всего Черного моря — 6.5 – $19.6 \cdot 10^5$ м 3 год $^{-1}$, что, по крайней мере, на 3 порядка меньше суммарной оценки для метановых сипов, приведенной в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе оценен поток струйного метана от 3 видов метановых струйных газовойделений, существующих в Черном море: метановых сипов на аноксических глубинах до 725 м, индуцированных вертикальным тепловым потоком газовойделения в зоне стабильности газогидратов, грязевых вулканов.
2. Среди рассмотренных источников поступления струйного метана в воды Черного моря наибольший вклад вносят метановые сипы на аноксических глубинах до 725 м, вклад других источников на порядки меньше.
3. Полученная оценка общей эмиссии струйного метана меньше, по крайней мере, в 2.5 раза,

чем соответствующие оценки, определенные биогеохимическими методами.

4. В связи с указанным в п. 3 несоответствием возникают вопросы об уточнении бюджета метана в Черном море. Возможно, флюидный поток метана из литосферы в гидросферу выше, чем представлялось ранее. Например, в [23] показано, что поток растворенного метана, переносимого в грязевых вулканах поровыми водами, может составлять значительные величины. Кроме того, пока не получена оценка значимости фактора спонтанных выбросов струйного метана с высотой факелов до 900 м в северо-восточном секторе впадины Сорокина. Особая сложность изучения этого фактора состоит в том, что участки выхода газа не имеют характерных батиметрических особенностей, таких, например, как грязевые вулканы [1].

Источник финансирования. Работа выполнена по теме государственного задания “Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем”, регистрационный номер ААААА18-118020890090-2, при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-45-920057 р_а, регистрационный номер АААА-А18-118082090056-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемов Ю. Г., Егоров В. Н., Гулин С. Б., Поликарпов Г. Г. Новые каналы струйной разгрузки метана во впадине Сорокина в глубоководной части Черного моря // Морской экологический журнал. 2013. Т. 12. № 4. С. 27-36.
2. Гулин С. Б., Артемов, Ю. Г. Исследование струйных выходов метана из дна Чёрного моря в международной экспедиции научно-исследовательского судна “Метеор” (Германия) в феврале 2007 г. // Морской экологический журнал. 2007. Т. 6. № 2. С. 98-100.
3. В. Н. Егоров, Г. Г. Поликарпов, С. Б. Гулин и др. Современные представления о средообразующей и экологической роли струйных метановых газовыделений со дна черного моря. // Морской экологический журнал. 2003. Т. 2. № 3. С. 5-26.
4. Егоров В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б. Метановые сипы в Черном море: средообразующая и экологическая роль / Под ред. Поликарпова Г. Г. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. 405 с.
5. Зайцев Ю. П., Поликарпов Г. Г. Черное море: Моря и внутренние водоемы // Природа Украинской ССР. К.: Наукова Думка, 1987. С. 17-29.
6. Круглякова Р. П., Круглякова М. В., Шевцова Н. Т. Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводородов на дне Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 1. С. 37 -51.
7. Леин А. Ю., Иванов М. В. Крупнейший на Земле метановый водоем // Природа. 2005. № 2. С. 18-26.
8. Поликарпов Г. Г., Егоров В. М. Виявлено активні газовиділення з дна Чорного моря // Вісн. АН УРСР. 1989. № 10. С. 108-111.
9. Туголесов Д. А., Горшков А. С., Мейснер Л. Б. и др. Тектоника мезокайнозойских отложений Черноморской впадины: М.: Недра, 1985. 215 с.
10. Artemov Yu. G., Egorov V. N., Polikarpov G. G., Gulin S. B. Methane emission to the hydro — and atmosphere by gas bubble streams in the Dnieper paleo-delta, the Black Sea // Mar. Ecol. J. 2007. V. 6. № 3. P. 5-26.
11. Bohrmann G., Pape T. Report and preliminary results of R/V METEOR Cruise M72/3, Istanbul — Trabzon — Istanbul, March 17th — April 23rd, 2007: Bremen: Marine gas hydrates of the Eastern Black Sea, 2007. 130 p.
12. Bohrmann G. and participants of RV METEOR cruise 84/2. Report and preliminary results of RV POSEIDON cruise 84/2 Istanbul-Istanbul 26 February–02 April 2011: Bremen: Universitiit Bremen, 2011. № 281. 164 p.
13. Çifçi G., Dondurur D., Ergün M. Deep and shallow structures of large pockmarks in the Turkish shelf, Eastern Black Sea // Geo Mar. Lett. 2003. V. 23. P. 311-322.
14. Ivanov M. V., Pimenov N. V., Rusanov I. I., Lein A. Y. Microbial processes of the methane cycle at the north-western shelf of the Black Sea // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2002. № 54. P. 589-599.
15. Ivanov M. V., Rusanov I. I., Lein A. Y. et al. Biogeochemistry of methane cycle in the anaerobic zone of the Black Sea // Proc. NATO Advanced Research Workshop “Past and present water column anoxia”, 4-8 October 2003, Crimea, Ukraine. Sevastopol, 2003. P. 42-43.
16. Jones G. A. Constraining the initiation and evolution of anoxia in the Black Sea by AMS radiocarbon dating // Radiocarbon. 1991. № 33. P. 211-212.
17. Kessler J. D., Reeburgh W. S., Southon J. et al. Basin-wide estimates of the input of methane from seeps and clathrates to the Black Sea // Earth and Planetary Science Letters. 2006. V. 243. P. 366-375.
18. Klaucke I., Sahling H., Weinrebe et al. Acoustic investigation of cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea // Mar. Geol. 2006. V. 231. P. 51-67.
19. Reeburgh W. S., Ward B. B., Whalen S. C. et al. Black Sea methane geochemistry // Deep-Sea Res. 1991. V. 38. № 2. P. 1189-1210.
20. Sahling H. and participants of RV POSEIDON cruise 317/4. Report and preliminary results of RV POSEIDON cruise p317/4 Istanbul-Istanbul 16 october–4 november 2004: Bremen: Universitiit Bremen, 2004. № 235. 92 p.
21. Sahling S., Bohrmann G., Artemov Yu. G. et al. Vodyanitskii Mud Volcano, Sorokin Trough, Black Sea: Geological characterization and quantification of gas bubble streams // Marine and Petroleum Geology. 2009. V. 26. № 9. P. 1799-1811.
22. Schubert C., Durisch-Kaiser E., Klauser L. et al. Recent studies on sources and sinks of methane in the Black

- Sea / Ed. Neretin L. N. Past and present water column anoxia, NATO Science Series. Netherlands: Springer, 2006. P. 419-441.
23. Wallman K., Drews M., Aloisi G., Bohrmann G. Methane discharge into the Black Sea and the global ocean via fluid flow through submarine mud volcanoes // Earth and Planetary Science Letters. 2006. V. 248. P. 545-560.
24. Zeikus J. G., Winfrey M. R. Temperature limitation of methanogenesis in aquatic sediments // Appl. Environ. Microbiol. 1976. V. 31. № 1. P. 99-107.

INFLUX OF STREAMING METHANE INTO ANOXIC WATERS OF THE BLACK SEA BASIN

© 2019 Yu. G. Artemov*, V. N. Egorov, S. B. Gulin

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: yu.g.artemov@gmail.com*

Received Mart 20, 2018

Revised version received April 29, 2019

After revision June 18, 2018

Based on data on the spatial distribution and fluxes of streaming (bubbling) methane within the Black Sea, the rate of dissolved methane inflow to Black Sea deep waters was assessed. Calculations showed that gas bubble streams annually replenish the methane budget in the Black Sea by $1.2 \cdot 10^9$ m³, or 0.9 Tg, which is considerably less than determined by known biogeochemical estimates of components of methane balance in the Black Sea.

Keywords: Black Sea, gas bubble streams, methane budget