

УДК 551.21

**ВЛИЯНИЕ ПОДВОДНЫХ ВЫБРОСОВ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ
КЕРЧЕНСКО-ТАМАНСКОГО РЕГИОНА НА КОНЦЕНТРАЦИИ
И ПОТОКИ МЕТАНА В АЗОВСКОМ МОРЕ**

© Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А.

Южный федеральный университет, Институт наук о Земле, г. Ростов-на-Дону, Россия

Экспериментальные измерения эмиссии метана в ряде действующих кратеров грязевого вулкана Гефест (гора Гнилая), находящегося в спокойном состоянии, и расположенном на юго-восточной окраине г. Темрюк, показали, что скорость потока метана из кратеров вулкана, варьирует в пределах 0,004-0,33 м³/м² в сутки (в среднем 0,2 м³/м² в сутки). В результате экстраполяции полученной средней скорости потока метана из действующих кратеров вулкана Гефест на всю площадь действующих кратеров грязевых вулканов побережья и дна Азовского моря, суммарная эмиссия метана в спокойные периоды, без учета его окисления при прохождении водной толщи моря, составила 1000 м³ сутки. Полученная ориентировочная величина в балансе метана в Азовском море незначительна и составляет менее 0,2% от его суммарной эмиссии донными отложениями в водную толщу моря.

Ключевые слова: *грязевые вулканы, метан, концентрация, потоки, баланс метана*

Грязевые вулканы являются геологическими структурами, представляющими собой отверстие или углубление на поверхности земли (сальза), либо конусообразное возвышение с кратером (грязевая сопка), из которого постоянно или периодически на поверхность Земли извергаются грязевые массы и газы, часто сопровождаемые водой и нефтью. Грязевые вулканы, как правило, встречаются в осадочных бассейнах и обычно связаны с месторождениями природного газа и нефти. По этой причине значительная часть газа, выделяющегося из грязевых вулканов, представлена метаном, доля других углеводородов и диоксида углерода незначительна [4, 18]. Глобальная выборка по более 140 наземным грязевым вулканам, расположенным в 12 странах [14], показала, что в среднем метан составляет 90% от газов, испускаемых грязевыми вулканами.

В отличие от высокотемпературных магматических вулканов, грязевулканические выбросы характеризуются относительно низкой температурой. Вместо жидкой магмы глубоко внутри земной коры образуется полужидкий грязевой осадок. Эта грязевая масса затем пропускается через узкие длинные отверстия или трещины, образуя на поверхности грязевулканический конус, а в некоторых случаях – грязевые наслоения («грязевой пирог») [9, 17]. Грязевые вулканы также могут различаться по размеру, одни из них составляют менее метра в диаметре, а другие могут покрывать до 100 км². Термин «грязевой вулкан» может относиться как к одиночному выходу, так и к группе жерл, а также совокупности обоих этих образований [13].

Формирование грязевых вулканов может быть связано с рядом вызванных глубинным давлением явлений, например, с лавинной седиментацией в очагах газовой генерации, со структурным или тектоническим сжатием земной коры [9]. Подобно магматическим вулканам, грязевые вулканы могут испытывать периоды покоя и активности, что сказывается на изменении объемов эмиссии метана. Однако значительные грязевулканические выбросы могут быть характерны и для спокойных периодов, в течение которых вулканы растут за счет постепенного истекания полужидкой грязевой массы, что часто, при воспламенении исходящих газов, сопровождается так называемыми «вечными огнями» [11]. При периодически происходящих активных извержениях на некоторых вулканах выделение грязи и пепла прослеживается на несколько километров в тропосфере [9].

Примерно 1100 грязевых вулканов зафиксированы на суше и на мелководье

континентальных шельфов [10]. Где-то от 1000 до 100000 грязевых вулканов может существовать ниже поверхности океана на континентальных склонах и абиссальных равнинах [19]. Вулканы, как правило, группируются в пояса, связанные с активными краевыми областями литосферных плит (рис. 1). В частности, более половины наземных грязевых вулканов мира расположены в Альпийско-Гималайском активном поясе, который простирается от Италии на Западе до Юго-Восточной Азии и Индонезии на востоке. Самая большая концентрация наземных грязевых вулканов находится в Азербайджане, с более чем 700 грязевыми вулканами [4, 11]. Крупные наземные и морские грязевулканические пояса также проходят вдоль Восточной и западной стороны Тихого океана и вдоль Карибского побережья Центральной и Южной Америки [9, 11].

Оценки ежегодной эмиссии метана отдельными грязевыми вулканами варьируют в широком диапазоне [11]. Одиночные жерла или кратеры малых грязевых вулканов (от 1 до 5 м в высоту) ежегодно могут выделять порядка десятков тонн метана. Один большой грязевой вулкан, состоящий из десятков или даже сотен жерл может выделять сотни тонн метана в год. При извержении грязевых вулканов всего за несколько часов может выделяться тысячи тонн метана. Так, при извержении грязевого вулкана Банки Макарова (Азербайджан) в 1958 г. количество выброшенного горячего газа было оценено Г.П. Тамразяном в 300 млн. м³ (столб пламени горящего газа диаметром 120 м и высотой 500 м) (см. [4]). Количество выделившегося газа при извержении Большого Кяниздага в 1950 г., по наблюдениям В.А. Горина, составило около 100 млн. м³, а при извержении грязевого вулкана Таурагай в 1947 г. – 495 млн. м³.

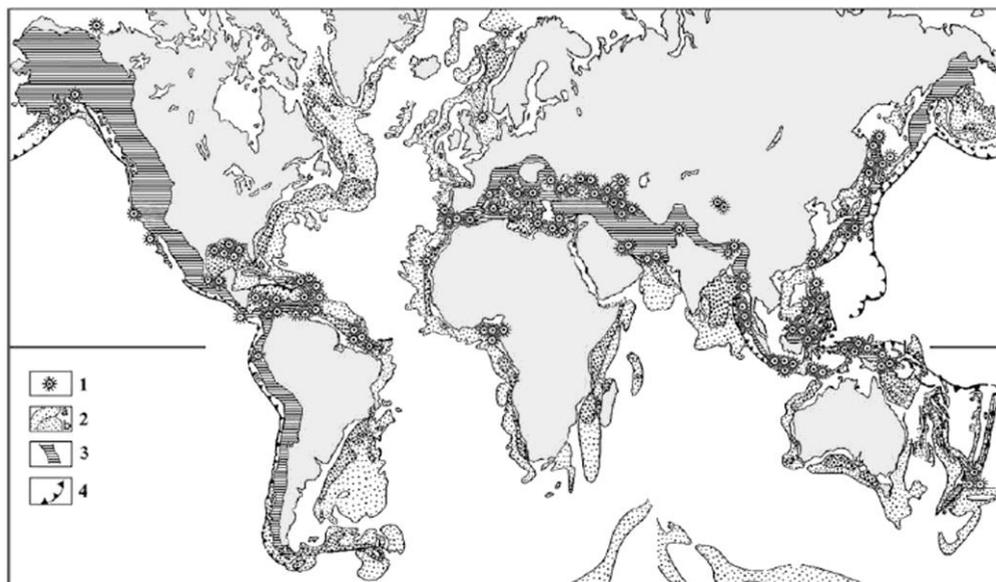


Рис. 1. Глобальное распределение грязевых вулканов (по [9]):

1 – одиночные грязевые вулканы, области с одиночными грязевыми вулканами, а также пояса грязевых вулканов; 2 – области маломощных (а) и мощных (б) слоев осадка; 3 и 4 – соответственно зоны активного сжатия и субдукции

Эмиссия метана грязевыми вулканами происходит не только из видимых кратеров и жерл; значительные объемы газа, выделяются вследствие диффузной дегазации через почвы (так называемое микровыделение). Количество газа, выделяемого в атмосферу таким способом, рассчитывается по площади грязевых вулканов, и зачастую сравнимо или даже больше, чем непосредственно на выходе из кратеров и отверстий [12, 15, 16]. Среднегодовой поток метана для территорий грязевых вулканов, включая микропросачивания и выходы из отверстий (но, не включая эпизодические

извержения), колеблется от 100 до 1000 тонн на км² [11].

По оценке [10], не учитывающей растворение и окисление метана в толще воды, величина эмиссии метана наземными и мелководными шельфовыми грязевыми вулканами находится в диапазоне от 10.2 до 12.6 Тг/год. По достаточно детальной оценке [15], основанной на экспериментальных измерениях потоков метана и учитывающей воздействие различных факторов, глобальная эмиссия метана наземными и мелководными грязевыми вулканами составляет от 6 до 9 Тг CH₄/год.

Такие крупные подводные грязевые вулканы как Каменный, Азовское Пекло, Тиздар, Темрюкский и Голубицкий, расположенные в прибрежной части акватории Темрюкского залива, и составляющие единую грязевулканическую провинцию с вулканами суши Керченско-Таманского региона (рис. 2), могут быть источниками поступления метана в водную толщу Азовского моря, поскольку рассматриваются как очаги газогидродинамической разгрузки быстропогружающегося осадочного бассейна [3, 8].

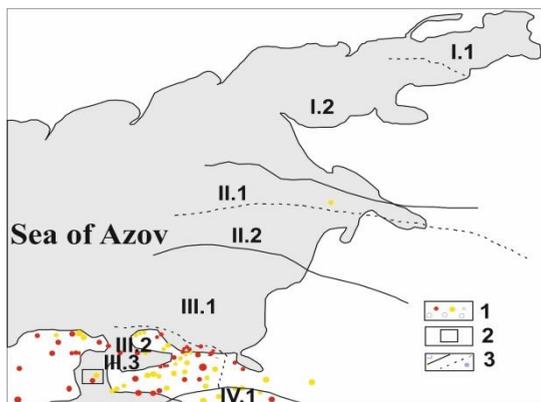


Рис. 2. Распространение грязевого вулканизма в акватории Азовского моря, Керченского пролива и на Керченском и Таманском полуострове (по [2]):

1 – грязевые вулканы: а – действующие, б – потухшие, в – предполагаемые по геофизическим данным; 2 – границы структур в Российском секторе а) первого порядка; б) второго порядка: Восточно-Европейская платформа: 1.1 – Ростовский выступ, 1.2 – Северо-Азовский прогиб; Скифская плита: II. 1 – Азовский вал, II.2 – Тимашевская ступень; Предкавказские альпийские прогибы и поднятия: III. 1 – Западно-Кубанский краевой прогиб, III.2 – Северо-Таманская зона поднятий, III.3 – Керченско-Таманский периклинальный прогиб; Складчато-глыбовое сооружение Большого Кавказа: IV – 1 – покровно-складчатая зона Северо-Западного Кавказа.

И здесь примечательны данные, полученные [6, 7] в ходе исследований грязевого вулкана Голубицкий в один из периодов его активной деятельности (1988 г.). Грязевулканическая деятельность этого вулкана в начальный период проявилась подводным выделением газов и вулканической грязи с различной интенсивностью во времени, что отмечалось по газовым пузырям и увеличению мутности морской воды в 150-200 м от берега. В результате образовался вулканический остров высотой около 5 м, длиной 100 м, шириной 50 м, с центральным жерлом в виде грязевого конуса высотой 25 см, диаметром 1 м, и 5 боковыми грифонами по периметру острова, из которых выделялись вода и газ. Исследования показали, что на фоновых участках (на удалении 0.3-5 км) в воде Азовского моря содержание метана варьирует в пределах 2.7-3.0 мкл/л, в то время как в зоне подводного выделения газовых струй и вулканической грязи его содержание составляло от 19.9 до 27.0 мкл в литре. Содержание метана в сопочной грязи было на два порядка выше, чем в отложениях фонового участка моря (10.0 и 0.13 мкг/г вл. ила соответственно). Близкими концентрациями метана характеризовалась выбрасываемая грязь при очередном извержении вулкана Голубицкий в июле 2008 г. (5.5 мкг/г) [3]. В свете изложенного вполне естественно увязать наблюдаемое увеличение содержания метана в районе вулкана с активизацией последнего и

поступлением газа из недр, что подтверждается данными изотопного анализа морской воды [5], а также высоким содержанием в грязи его гомологов ($n \cdot 10^{-3}$ мкг/г) [3]. Сходными концентрациями метана характеризовались вода (26.3-27.0 мкл/л) и донные отложения (6.12 мкг/г вл. ила) на участке выделения со дна газовых струй и термальных вод в кратерном озере грязевого вулкана Миска, расположенного на побережье Азовского моря недалеко от подводного грязевого вулкана Голубицкий.

Нами с помощью стационарных накопительных камер (ловушек) [1, 7] были проведены экспериментальные измерения эмиссии метана в небольших кратерах грязевого вулкана Гефест (гора Гнилая), расположенном на юго-восточной окраине г. Темрюк, в период спокойного его состояния (рис. 3). Гора Гнилая представляет собой открытое плато площадью 6000 м², на котором находится цепочка грязевых кратеров разных размеров. В настоящее время на вулкане насчитывается свыше 110 кратеров, около 50 из которых действующие, размерами от нескольких см до 6 м. Извергается вулкан обычно каждые 5 лет и по времени извержение продолжается от нескольких часов до нескольких суток. При извержении столб грязи с газом поднимается на высоту до 5 м (иногда 32 м). На поверхности ряда кратеров с бульканьем выделяются пузыри газа, на которые нами были поставлены 2 накопительные камеры (ловушки) для измерения потоков метана. Также были установлены 2 ловушки в кратерах на расстоянии от выделяющихся пузырей газа. Концентрация метана в грязевых отложениях кратеров варьировала от 2,36 до 2,54 мкг/г и была одного порядка с концентрацией метана в сопочной грязи подводного грязевого вулкана Голубицкий (см. выше), в то время как по данным наблюдений, опубликованным Алексеем Бяковым (www.kko.eago.ru), концентрация метана в брекчиевидной грязи, выброшенной при активизации вулкана Гнилая гора в 2002 г., составляла до 228,9 мкг/г, то есть почти в 100 раз больше.



Рис. 3. Стационарная камера (ловушка) для накопления метана и определения скорости его потока, установленная в одном из кратеров вулкана Гнилая гора (Гефест)

Экспериментально измеренная нами скорость потока метана из действующих кратеров вулкана Гнилая гора (Гефест), находящегося в спокойном состоянии, варьирует в пределах 0,004-0,33 м³/м² в сутки (в среднем 0,2 м³/м² в сутки). Если принять, что площадь действующих 50 кратеров вулкана Гефест в среднем составляет по 1 м², то эмиссия метана со всех этих кратеров и отверстий ориентировочно составит 10 м³ в сутки. Однако, как отмечено выше, эмиссия метана грязевыми вулканами происходит не только из видимых кратеров и жерл; значительные объемы газа, выделяются вследствие диффузной дегазации через давно излившуюся грязь (продукты твердых выбросов вулкана) и недействующие кратеры. Если рассчитать количество газа,

выделяемого таким способом в атмосферу, на всю площадь грязевого вулкана Гнилая гора (6000 м^2), то суммарная эмиссия метана в атмосферу с его поверхности составит $1210 \text{ м}^3/\text{сутки}$. На наш взгляд эта величина, по крайней мере, на порядок завышена, поскольку не учитывает снижение скорости выделения метана, вследствие его окисления метанотрофными бактериями при прохождении через поверхностный уплотненный слой излившихся и потерявших влагу грязей.

Если экстраполировать экспериментально полученную нами среднюю скорость эмиссии метана ($0,2 \text{ м}^3/\text{м}^2$ в сутки) из действующих кратеров вулкана Гнилая гора на всю площадь действующих кратеров грязевых вулканов побережья и дна Азовского моря, по нашим расчетам не превышающую 5000 м^2 , то суммарная эмиссия метана в спокойные периоды, без учета его окисления при прохождении водной толщи моря, составит 1000 м^3 сутки. Часть этого метана, частично растворится и окислится, так и не достигнув границы раздела «вода – атмосфера». Это, в основном, касается метана, который поступил в водную толщу, вследствие диффузионного переноса. А другая часть метана, которая поступила в воду в составе газовых пузырьков, согласно [20], вследствие мелководности Азовского моря, почти вся выделится в атмосферу.

Полученная ориентировочная величина эмиссии метана грязевыми вулканами побережья и дна Азовского моря в балансе метана в Азовском море (без Таганрогского залива) незначительна и составляет менее 0,2% от его суммарной эмиссии донными отложениями в водную толщу моря [1]. В целом, подводные грязевые вулканы оказывают локальное повышающее воздействие на концентрации метана в водной толще моря и его потоки, с максимальным увеличением в период оживления грязевулканической активности.

Определение содержания и оценка потоков метана выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01229). Балансовые расчеты выполнены при поддержке РФФИ (проект № 16-05-00976).

Литература

1. *Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С.* Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // Метеорология и гидрология, 2016. № 6. С. 48–58.
2. Доклад о состоянии природопользования и об охране окружающей среды Краснодарского края в 2015 году. Краснодар: Министерство природных ресурсов краснодарского края, 2016. 483 с.
3. *Круглякова Р.П., Курдюков П.И., Глазырин Е.А., Тереножкин А.М., Елецкий Ю.Б., Шумаков Д.В.* Геолого-геохимическая характеристика грязевых вулканов Темрюкского залива // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2012. № 11. С. 13–19.
4. *Соколов В.А.* Геохимия природных газов. М.: Недра, 1971. 336 с.
5. *Федоров Ю.А.* Идентификация метана разного происхождения с помощью стабильных изотопов углерода и водорода // Материалы Международной конференции «Экологические проблемы. Взгляд в будущее». Ростов н/Д.: Изд-во ООО «ЦВВР», 2004. С. 149–152.
6. *Федоров Ю.А.* Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М.: МО РФ Центр «Истина», 1999. 370 с.
7. *Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О.* Метан в водных экосистемах. 2-е изд., перераб. и доп. Ростов-на-Дону – Москва: Ростиздат, 2007. 330 с.
8. *Холодов В.Н.* Грязевые вулканы: закономерности размещения и генезис. Сообщение 1. Грязевулканические провинции и морфология грязевых вулканов // Литология и полезные ископаемые, 2002. № 3. С. 227–241.
9. *Dimitrov L.I.* Mud volcanoes – A significant source of atmospheric methane // Geo-Marine Letters. 2003. Vol. 23(3-4). PP. 155–161.
10. *Dimitrov L.I.* Mud volcanoes – The most important pathway for degassing deeply buried sediments // Earth-Science Reviews, 2002b. Vol. 59(1–4). PP. 49–76.
11. EPA, 2010. Methane and nitrous oxide emissions from natural sources. U.S. Environmental Protection Agency Office of Atmospheric Programs, Washington, DC, USA, 2010. 194 p.
12. *Etioppe G.* Mud volcanoes and microseepage: The forgotten geophysical components of atmospheric methane budget // Annals of Geophysics, 2005. Vol. 48(1). PP. 1–7.
13. *Etioppe G., Caracausi A., Favara R., Italiano F., Baciuc C.* Reply to comment by A. Kopf on «Methane Emissions From the Mud Volcanoes of Sicily (Italy)» and notice on CH₄ flux data from European

- mud volcanoes // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30(2). Art. No. 1094.
14. *Etiopé G., Feyzullayev A., Baciu C.* Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: A global perspective of gas origin // *Marine Petroleum Geology*, 2009. Vol. 26(3). PP. 333–344.
 15. *Etiopé G., Milkov A.V.* A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere // *Environmental Geology*, 2004. Vol. 46(8). PP. 997–1002.
 16. *Hong W.L., Yang T.* Methane flux from accretionary prism through mud volcano area in Taiwan – from present to the past // *Proceedings of the 9th International Conference on Gas Geochemistry*, October 1–8, 2007. National Taiwan University. 2007. PP. 80–81.
 17. *Kopf A.J.* Significance of mud volcanism // *Reviews of Geophysics*. 2002. Vol. 40(2). Art. № 1005.
 18. *Kvenvolden K.A., Rogers B.W.* Gaia's breath – Global methane exhalations // *Marine and Petroleum Geology*. 2005. Vol. 22(4). PP. 579–590.
 19. *Milkov A.V.* Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates // *Marine Geology*. 2000. Vol. 167(1–2): PP. 29–42.
 20. *Schmale O., Greinert J., Rehder G.* Methane emission from high-intensity marine gas seeps in the Black Sea into the atmosphere // *J. Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32(7): L07609.