



УДК 550.42

В. Н. Егоров, докт. биол. наук, зав.отделом, **Г. Г. Поликарпов**, акад. НАНУ, гл. науч. сотр.,
С. Б. Гулин, докт. биол. наук, вед. науч. сотр., **Ю. Г. Артемов**, м. н. с.,
Н. А. Стокозов, м. н. с., **С. К. Костова**, канд. биол. наук, ст. н. с.

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной Академии наук Украины,
Севастополь, Украина

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СРЕДООБРАЗУЮЩЕЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РОЛИ СТРУЙНЫХ МЕТАНОВЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ СО ДНА ЧЕРНОГО МОРЯ

Дано обобщение современного уровня исследований струйных метановых газовыделений в Черном море. Приводится карта локализации полей газовыделений в Черном море, а также распределение метановых сипов по глубине и по вертикальной протяженности газовых струй. Описаны физико-химические характеристики пузырьков — состав газа, размеры, скорость всплытия, а также осредненные по площади дна оценки потока метана в водную толщу. Анализируются данные о влиянии метановых сипов на биологическую продуктивность вод, структуру звукорассеивающих слоев (ЗРС) и трансформацию физико-химических форм ртути. Обсуждаются результаты химических, изотопных и микробиологических исследований образцов карбонатных построек в местах струйных выходов метана. Рассматриваются вопросы генезиса метана в Черном море в связи с перспективностью региона в отношении углеводородных месторождений.

Ключевые слова: Черное море, струйные метановые газовыделения, поток метана, карбонатные постройки, бактериальные маты, радиоуглеродный возраст

Уникальность и далекая от полноты изученность Черного моря, как самого большого в мире меромиктического бассейна с сероводородным заражением глубинных вод, продолжают подтверждаться обнаружением в нем все новых геологических, геофизических, геохимических и экологических особенностей. Только за последние десятилетия обнаружены и описаны крупные залежи газогидратов [4, 27], открыты глубоководные грязевые вулканы [6] и струйные метановые газовыделения [8], а также обнаружены карбонатные кораллоподобные постройки в местах газовой разгрузки недр [2, 5], связанные с протеканием биотических процессов по неизвестным ранее механизмам бактериального метаноокисления в восстановительной зоне Черного моря.

С момента обнаружения полей струйных метановых газовыделений в украинском [8, 10] и болгарском [24] секторах Черного моря интерес к этой проблеме был проявлен в связи с необходимостью изучения их приуроченности к подстилающим породам и геологическим разломам, к углеводородным месторождениям и исследованию воздействия на газовый состав и биологическую продуктивность морских вод, а также на их вклад в баланс парниковых газов [32]. За истекшее десятилетие наше основное внимание привлекли проблемы изучения средообразующих и экологических эффектов в окислительной и восстановительной зонах Черного моря, обусловленных влиянием метановых сипов.

Целью настоящей работы является обобщение основных результатов этих исследований.

Материал и методы. Исследования выполнялись в Черном море в 18 рейсах на НИС «Профессор Водяницкий» в 1989 – 2003 гг. и на исследовательской подводной лодке (ПЛБ) «Бентос-300» в 1990 г. Для регистрации и определения характеристик интенсивности сипов использовались гидроакустические комплексы ЕК-400 и ЕК-500 со спутниковой системой определения географических координат (GPS), а также управляемая подводная телевизионная установка MiniRover МК-II с привлечением водолазных работ. Результаты исследований накапливались в банке координат локализации полей струйных газовыделений, а с 1998 г. и в банке электронных эхограмм сипов. К настоящему времени база данных содержит информацию о координатах и глубине локализации свыше 3000 площадок струйных метановых газовыделений. Работы выполнялись по проектам, финансируемым из бюджета Украины, Правительства Грузии и Научного Фонда «Фольксваген», Советом по Научным Исследованиям Германии (Grant No. DFG Ke 287/10-1), NATO Project EST.CLG.978266 и по проектам ЕС (EROS-2000, INCO-COPERNICUS Project IC15 CT96 0107, а также ЕС RTD Projects EVK2-2001-00322 - CRIMEA и METROL).

Результаты и обсуждение. Исследования газовой разгрузки морей Мирового океана показали [1, 23], что струйные газовыделения со дна Черного моря могут быть классифицированы как холодные сипы. Поля струйных газовыделений в Черном море расположены в основном на кромке шельфа и материковом склоне Черного моря, в палеорусле рек Днепр, Дунай, Дон и в приустьевых районах ряда кавказских рек (рис. 1). Исследования показали, что дегазация недр приурочена как к зонам основных геологических раз-

ломов дна в Черном море, так и к районам вне их пределов [9]. При мелкомасштабном рассмотрении (рис. 2) видно, в районе палеорула Днепра метановые сипы в значительной части располагались по гребням и склонам поднятий и в меньшей степени - в лощинах. Успехи в разработке математического обеспечения для интерпретации гидроакустических наблюдений позволили нам обнаружить и зафиксировать в качестве постоянно действующего фактора глубоководные сипы (рис. 3), располагающиеся в местах развитого грязевого вулканизма [15]. Гидроакустические и визуальные наблюдения с помощью водолазных работ и с глубоководных исследовательских подводных лодок показали, что истечения газа имели как непрерывный, так и пульсирующий характер [3, 9, 14].

До настоящего времени пробы газа отбирались с глубины до 380 м. С максимальной глубины газ был отобран исследовательской подводной лодкой «Яго» с НИС «Профессор Логачев» летом 2001 г. Анализ химического состава газов показал, что в струйных газовыделениях, расположенных на кромке северо-западного шельфа и верхней части материкового склона Черного моря (глубины 64 - 371 м), содержится от 80.0 до 99.6 объемных % метана [5, 7, 9, 30]. Наибольшие величины содержания метана получены в пробах газа, отобранных непосредственно у дна, а наименьшие – в поверхностном слое воды. Очевидно, это различие обусловлено частичной диффузией метана из газовых пузырей в водную толщу при их подъеме к поверхности моря.

Расчеты показали, что поперечные размеры площадок газовой разгрузки часто достигали 300 и более метров [9, 10]. Размеры пузырьков газа составляли от 0.2 до 98.0 мм, с наибольшей встречаемостью размерной группы диаметром 4.0 - 13.0 мм. Скорость всплытия пузырьков газа находилась в пределах 12 -

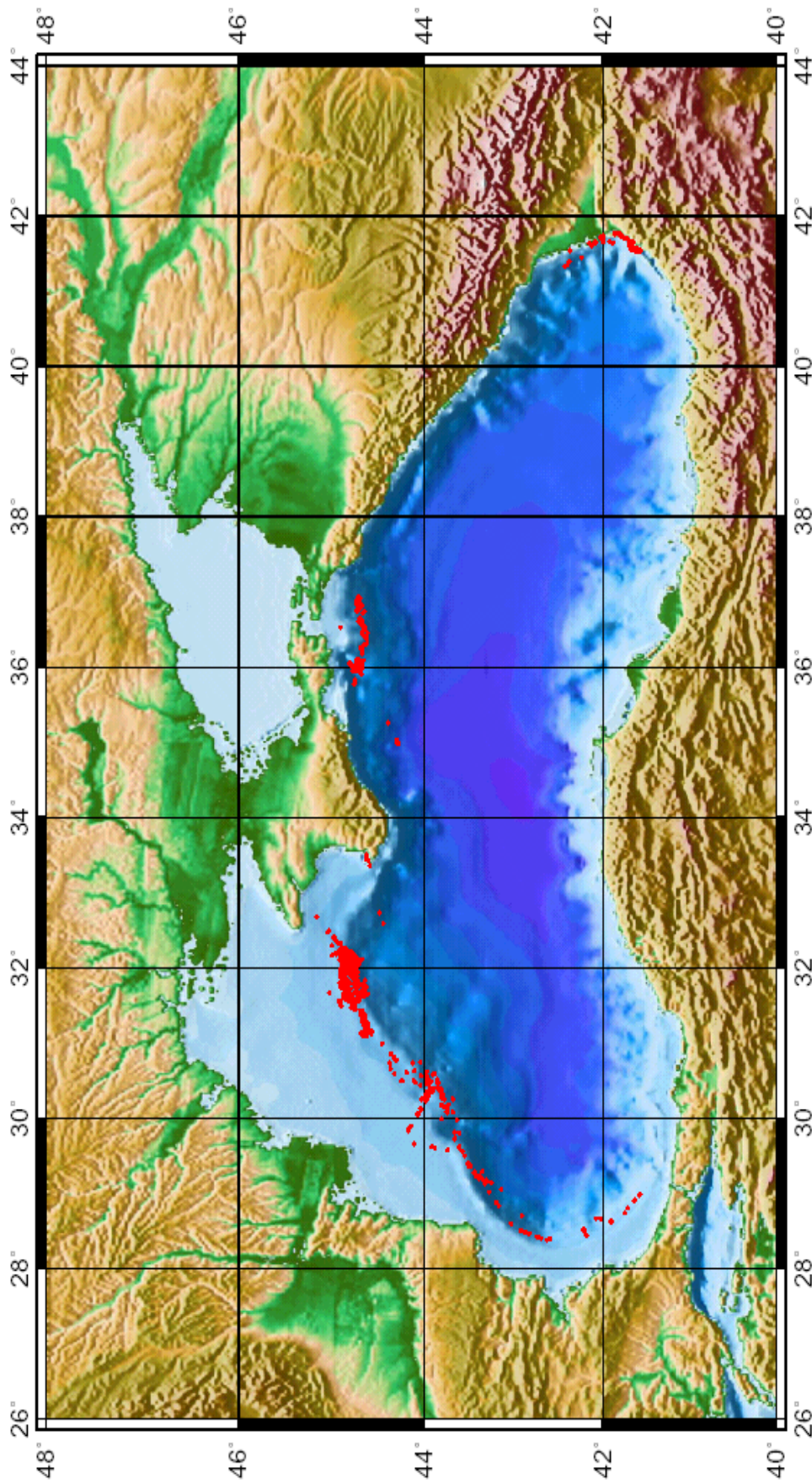


Рис. 1. Карта распределения струйных метановых газовыделений в Черном море
Fig.1. Location map of gas bubble streams in the Black Sea

14 м мин⁻¹ и составляла в среднем 22.5 см с⁻¹ [3, 10, 14, 19]. Из анализа эхограмм следовало, что наиболее мелкие пузырьки имеют более низкую скорость всплытия [19], экстрагируются придонными течениями и могут создавать газовый туман у дна [12].

Относительная вертикальная протяженность газовых струй с площадок газовыделений и гистограмма распределения приуроченности метановых сипов к различным глубинам показаны на рис. 4 и 5.

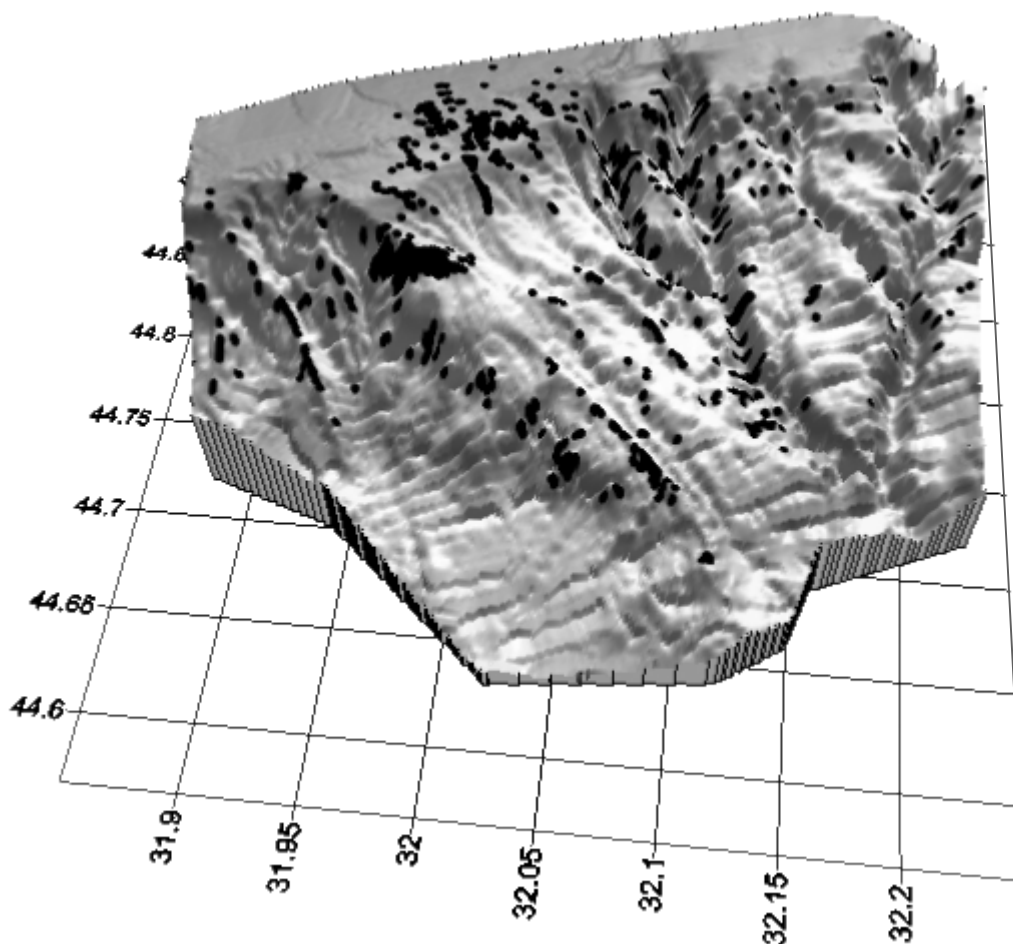


Рис. 2. Локализация струйных метановых газовыделений в районе палеоруслу Днепра, расположенного в интервале глубин 70 - 1200 м

Fig.2. Localization of gas bubble streams in the paleoDnieper area at 70 - 1200 m water depth

Эти рисунки построены по данным банка эхограмм. При их построении учитывалась максимальная высота прослеживания струй на эхограммах. В рассмотрение входили также газовыделения с одних и тех же площадок, регистрируемые в различные периоды времени. Поэтому данные, иллюстрируемые рис. 4 и 5, отражают статистически достовер-

ную картину распределения высоты газовых струй на различных глубинах Черного моря с учетом вариабельности во времени интенсивности газовыделений. Представленные на рис. 4 данные свидетельствуют о том, что достигать верхних слоев моря и выходить в атмосферу могут, как правило, только струи газовыделений с глубин не более 250 м.

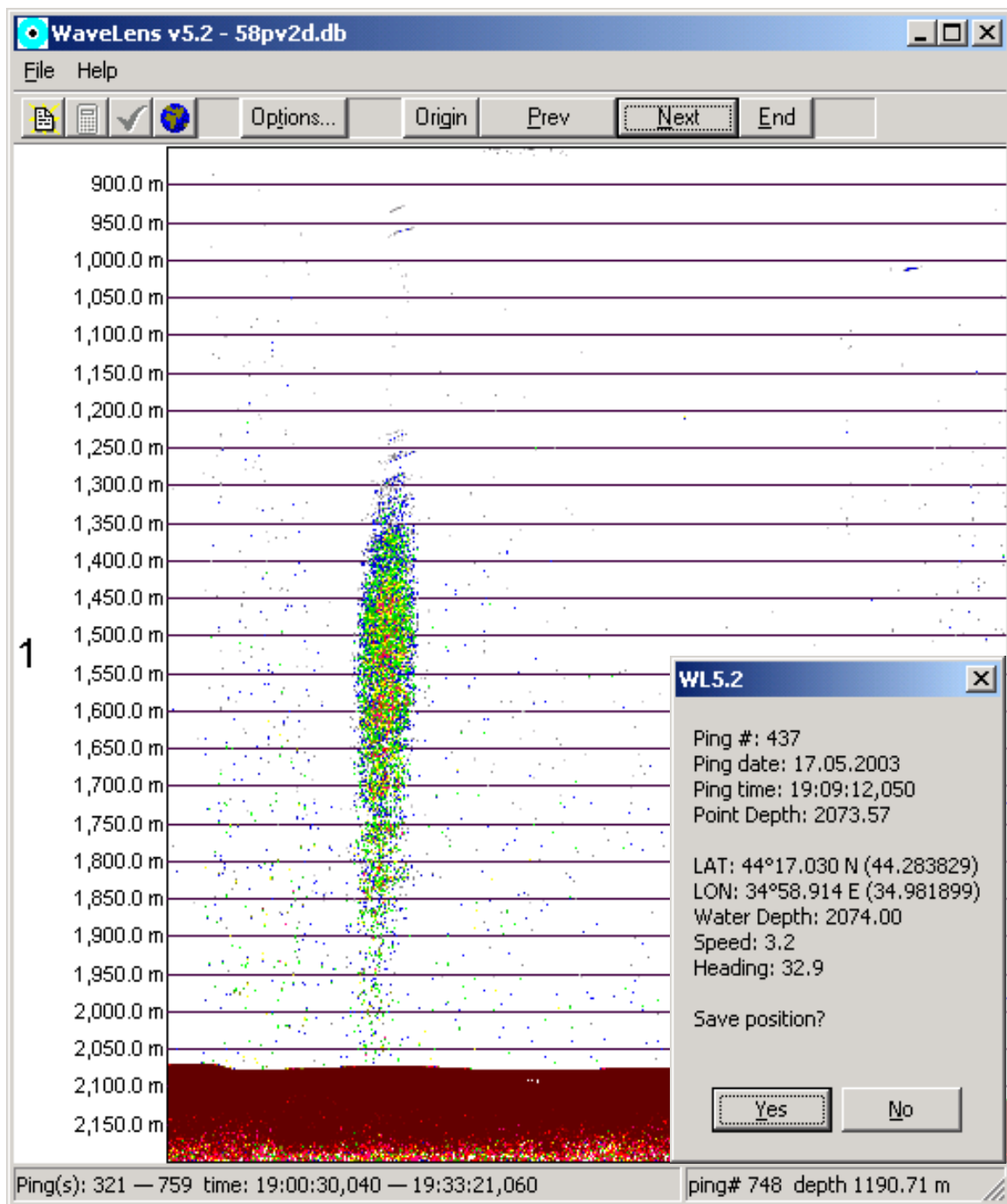


Рис. 3а. Глубоководные струйные газовыделения в местах проявления грязевого вулканизма в Черном море

Fig. 3a. Mud volcanoes gas bubble streams at the Black Sea abyssal area

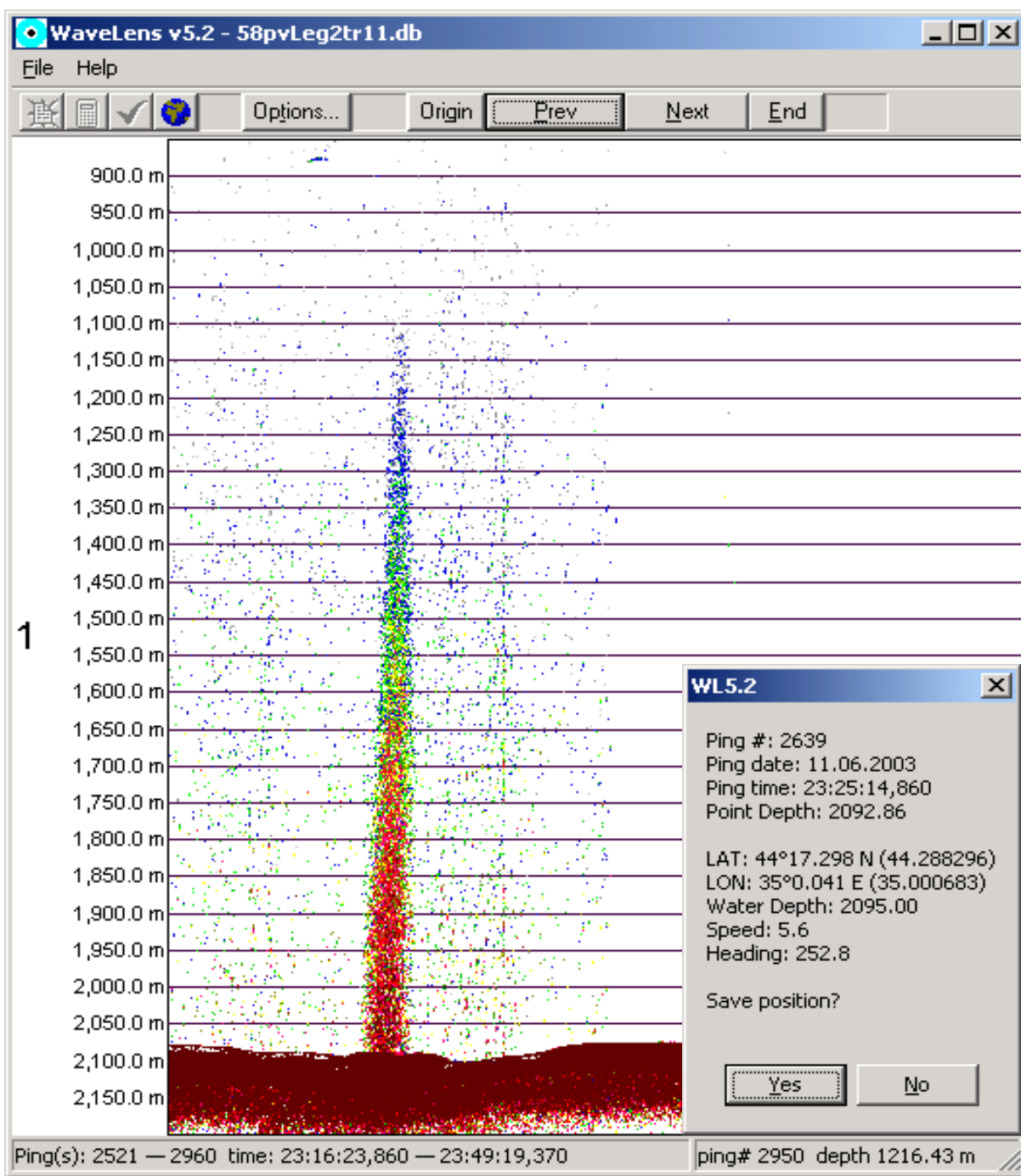


Рис. 3б. Глубоководные струйные газовыделения в местах проявления грязевого вулканизма в Черном море

Fig. 3b. Mud volcanoes gas bubble streams at the Black Sea abyssal area

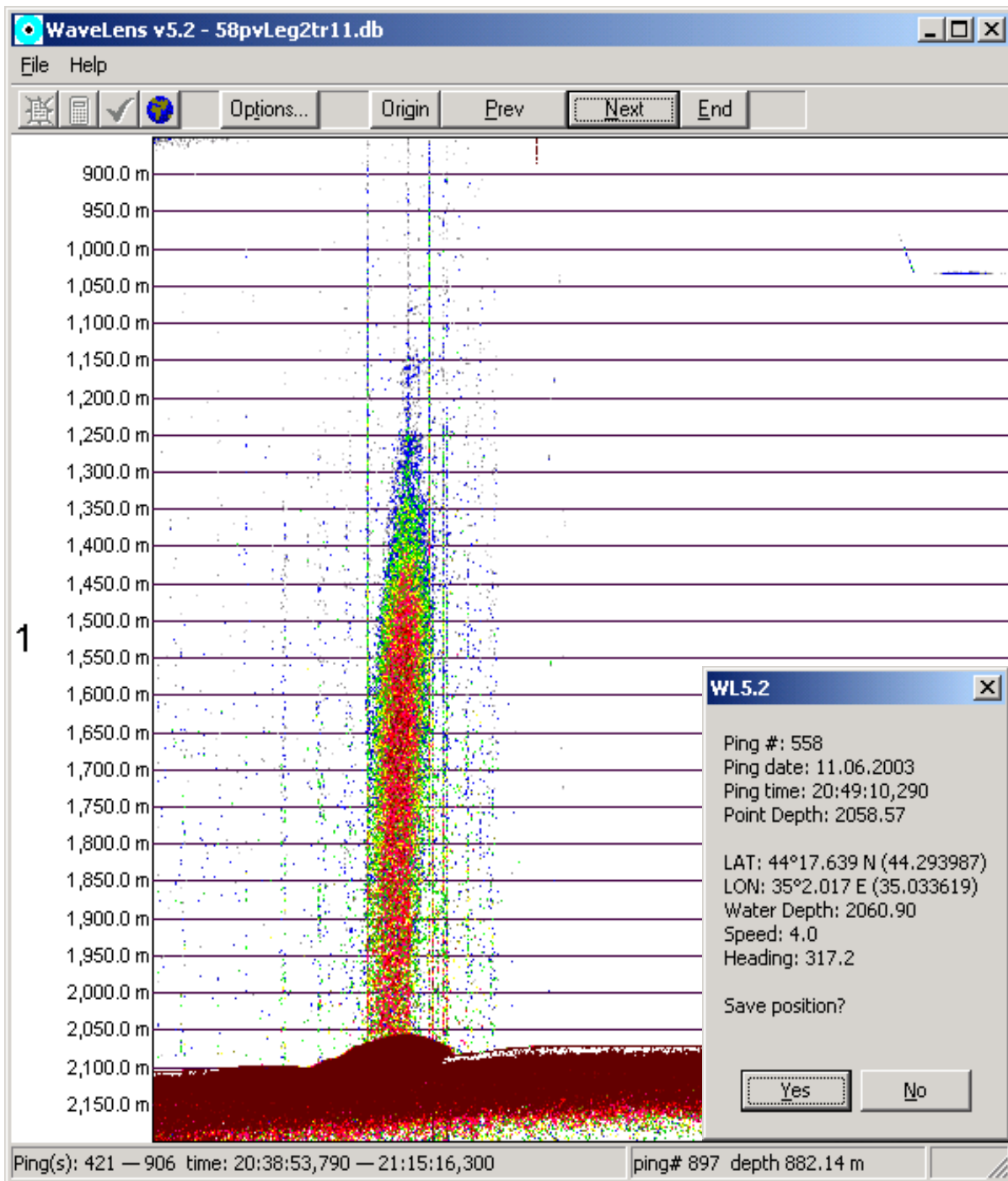


Рис. 3с. Глубоководные струйные газовыделения в местах проявления грязевого вулканизма в Черном море

Fig. 3с. Mud volcanoes gas bubble streams at the Black Sea abyssal area

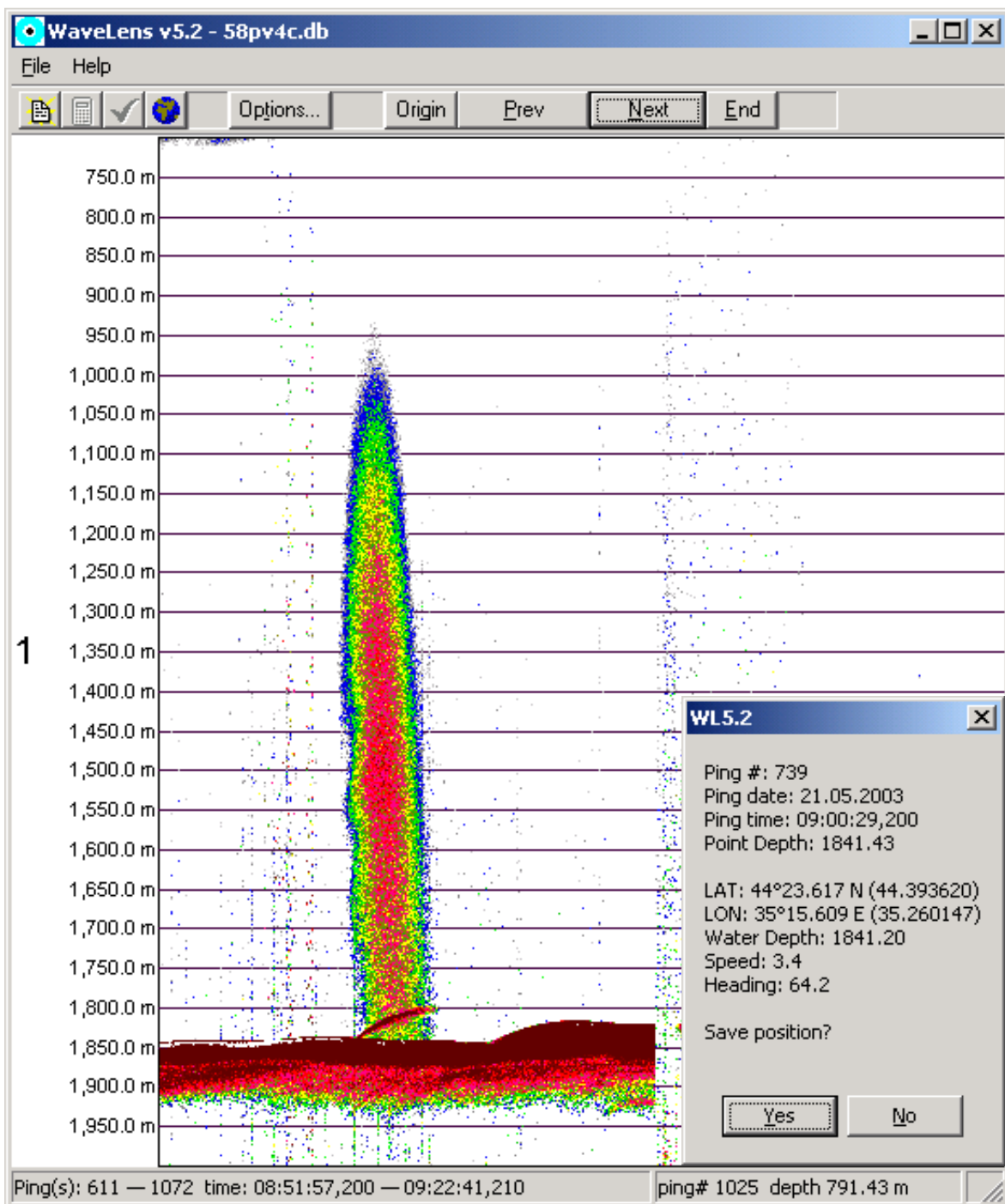


Рис. 3d. Глубоководные струйные газовыделения в местах проявления грязевого вулканизма в Черном море

Fig. 3d. Mud volcanoes gas bubble streams at the Black Sea abyssal area

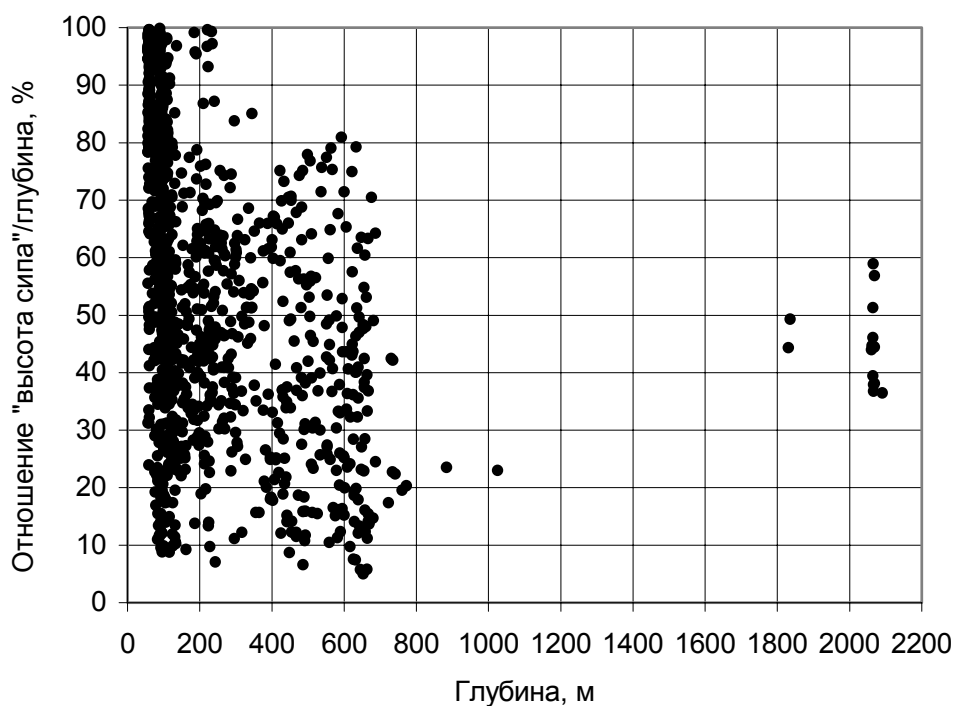


Рис. 4. Относительная вертикальная протяженность газовых струй с разных глубин

Fig. 4. Relative extension of gas bubble streams in water column vs water depth

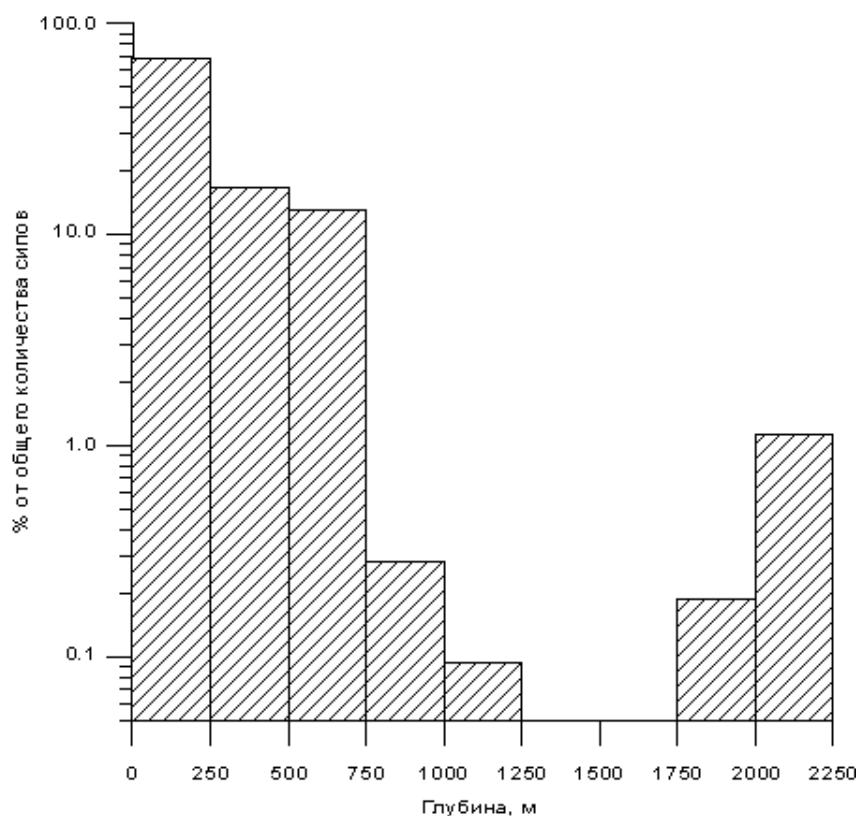


Рис. 5. Гистограмма распределения газовыделений по глубине

Fig. 5. Distribution of gas bubble streams vs water depth

Так как в процессе всплытия происходит растворение и газообмен пузырьков с водной средой, то только часть от потока дегазации недр Черного моря достигает атмосферы (рис. 5). Из рис. 5 видно, что количество площадок газовыделений с глубин менее 250 м составляет около 68 % от общего их числа, зарегистрированного в банке данных. Это означает, что достигнуть поверхности и выходить в атмосферу может до двух третей от величины потока метана, выходящего со дна моря на глубинах до 250 м.

Рис. 4 показывает, что подавляющее число сипов в Черном море расположено на глубинах, не превышающих 750 м. В то же время площадки газовыделений были обнару-

жены и на глубинах 900 - 1000, а также свыше 1800 м.

Представление данных распределения газовыделений по глубине на диаграмме устойчивости газогидратной формы метана [33] в морской воде (рис. 6) свидетельствует, что существование струйных газовыделений в пределах глубин 900 - 1000 м и над грязевыми вулканами с глубин свыше 1800 м не может быть объяснено в рамках существующих теоретических концепций, так как на глубинах свыше 750 м, при температуре вод около 9°C и солености свыше 22.5 ‰, метан может существовать только в газогидратной форме. Для объяснения отмеченного феномена требуются дополнительные исследования.

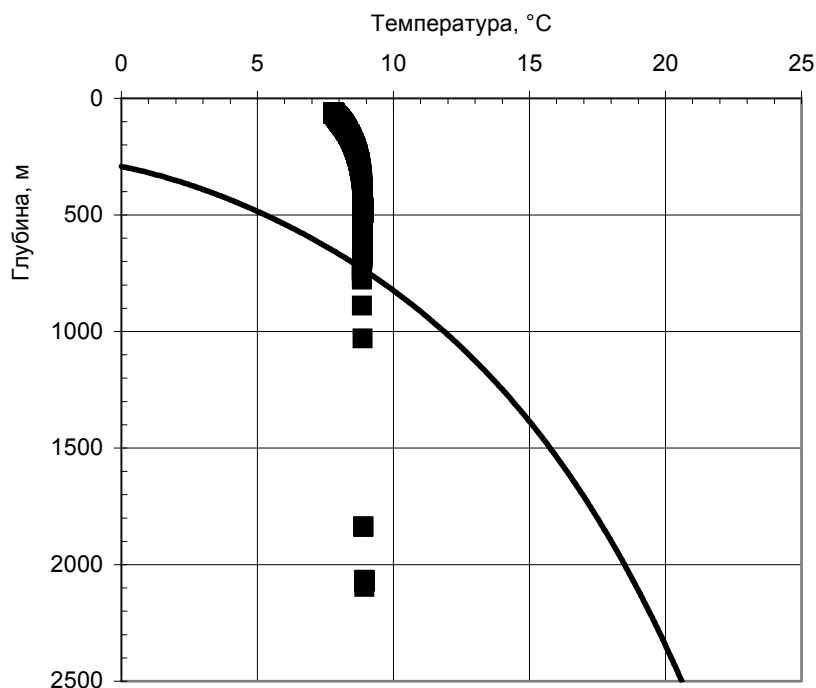


Рис. 6. Распределение струйных газовыделений на номограмме устойчивости газогидратной формы метана

Fig. 6. Distribution of gas bubble streams at the hydrate stability field for pure methane chart

В настоящее время имеются только единичные публикации, в которых по результатам наблюдений оценивается поток струйных метановых газовыделений [3, 14, 25].

Для мелкомасштабной оценки потока метана со дна использовались наблюдения аквалангистов и водолазов, отбор газа ловушками, съемка с исследовательских подводных

лодок, а также гидроакустические методы. Исследования показали, что для крупномасштабной оценки суммарного потока газа с поверхности морского дна удобен в применении дистанционный акустический метод [3, 19]. Этот метод основан на использовании данных сканирования водного столба калиброванным

эхолотом при выполнении судном сетки галсов в пределах исследуемого полигона. Вычислительная схема метода оценки потока газа базируется на определении объема пузырькового метана в анализируемом слое вод и вычислении скорости всплытия пузырьков. При этом все расчеты потока выполняются относительно площади анализируемой акватории.

Примеры расчетов для полигона на глубинах 60 - 68 м., лежащего в координатах 44°53.43 с. ш. - 31°49.08 в. д.; 44°51.43 с. ш. - 31°49.00 в. д.; 44°53.43 с. ш. - 31°53.58 в. д., 44°51.43 с. ш. - 31°53.58 в. д., а также оценки интегральных потоков с площадок газовыделений в северо-западной и западной части Черного моря приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчет потока метана с площадок газовыделений в северо-западной и западной части Черного моря

Table 1. Evaluation of area averaged methane flux in the NW and W Black Sea

Параметр	Значение
Средний объем пузырьков газа (v) в интервале глубин 60-65 м в пределах полигона, (m^3), $v=a^3 \cdot 4 \cdot \pi / 3$	23.4 мл
Объемная плотность пузырьков (n) в $1 m^3$ слоя 60-65 м в пределах полигона, (m^{-3}) $n = \log_{10}((10 \cdot \log(Sv) - TS) / 10)$	$5.84e-4 m^{-3}$
Количество содержащегося в пузырьках метана, осредненное по площади полигона (приведено к атмосферному давлению)	13.65 мкл·м ⁻³ или 0.6 CH ₄ (нМ)
Оценка потока метана в районах струйных газовыделений различной интенсивности в пределах полигона (приведено к атмосферному давлению)	Мин.: 260 м ³ ·км ⁻² ·сут ⁻¹ Макс.: 33800 м ³ ·км ⁻² ·сут ⁻¹
Оценка потока метана, осредненного по площади полигона	262 м ³ ·км ⁻² ·сут ⁻¹ или 898 м ³ миль ⁻² сут ⁻¹
Экстраполяционная оценка потока метана в водную толщу с площади 1573 мили в северо-западной части Черного моря (приведено к атмосферному давлению)	$5.2 \cdot 10^8 m^3 \cdot год^{-1}$
Экстраполяционная оценка потока метана в водную толщу с площади 6689 мили в западной части Черного моря (приведено к атмосферному давлению)	$2.2 \cdot 10^9 m^3 \cdot год^{-1}$

Из таблицы видно, что осредненная по площади оценка потока метана близка к минимальному значению потока от отдельной струи. Это обусловлено тем, что струйные газовыделения встречались лишь на 17 % площади, по которой производилось осреднение.

Согласно обобщенной балансовой модели [31], поток метана со дна шельфа и свала глубин в Черном море в результате прямого разложения органики оценивается величиной порядка 94 мл м⁻² сут⁻¹. При этом концентрация метана в глубоководной части Черного моря, составляя 10 нМ в верхнем 100 м слое, увеличивается до 11 нМ на глубине 550 м не

изменяется на больших глубинах. Наши оценки показывают, что осредненная по площади концентрация метана в пузырьках существенно ниже (0.6 нМ) этих величин (табл.1). Однако под воздействием подъемной силы на газовые пузырьки возникает фактор направленного транспорта метана. В результате этого осредненный по площади поток метана ($262 m^3 \cdot км^{-2} \cdot сут^{-1}$), образованный струйными газовыделениями, не менее чем в 2.8, а непосредственно в сипах может быть в 360 раз выше, в сравнении с оценкой потока метана со дна шельфа и свала глубин в Черном море. Поэтому поступление пузырькового метана в

водную толщу со дна западной части Черного моря сопоставимо по порядку величин с количеством метана, продуцируемого в донных осадках шельфа и свала глубин всего Черного моря.

Измерения, проведенные с 1989 по 2003 г., показали, что при крупномасштабном рассмотрении струйные метановые газоразделения в основном не влияли на такие гидрологические и гидрохимические параметры вод, как температура, соленость, плотность, рН

и Eh. Это, по-видимому, связано с тем, что интенсивность процессов перемешивания вод за счет течений, турбулентности и адвекции превышает скорость изменения градиентов этих параметров в результате воздействия струйных метановых газоразделений. В то же время, в отдельных случаях непосредственно в местах просачивания пузырьков метана отмечались отличия в значениях Eh (табл. 2), что позволяло допустить наличие в придонном слое воды следовых количеств сероводорода.

Таблица 2. Гидрохимическая структура вод на площадке метановых сипов с координатами 42° 00.45 с. ш. - 41° 43.42 в. д. [14]

Table 2. Hydrochemical characteristic of water over the active seepage area at 42°00.45 N - 41°43.42 E [14]

Глубина, м	Кислород, мл·л ⁻¹	Сероводород, мл·л ⁻¹	рН	Eh, mv
0	6.85	Не обнаружен	8.67	+ 109
14	6.51	-	8.64	+ 114
21	6.87	-	8.63	+ 120
30	7.00	-	8.49	+ 155
36 (дно)	6.96	-	8.41	- 91

В летнее время, при больших градиентах сезонного термоклина, зарегистрировано снижение температуры в слое скачка над сипом на 0.6°C (рис. 7), в сравнении со смежной акваторией. В этом районе был определен поток метана со дна и выполнена оценка диссипации энергии за счет турбулентной диффузии и сдвиговых течений через градиентный слой. Сравнение показало, что диссипация энергии при всплытии пузырьков метана имеет тот же порядок величин и может превышать диссипацию энергии за счет физических процессов в слое летнего термоклина [3]. Эти данные показывают, что в районах метановых сипов струи газа могут доставлять в зону фотосинтеза биогенные элементы, тем самым опосредованно повышая первичную продуктивность вод.

Анализ микроэлементного состава вод и донных осадков позволил зарегистрировать эффект ртутного загрязнения морской среды в местах проявления струйных метановых газоразделений.

Первые исследования по определению ртути выполнены в 31-м рейсе НИС "Профессор Водяницкий" (2 июля - 12 августа 1990 г.): на станции с координатами 44° 50.100 с. ш. - 31° 41.017 в. д. и глубиной 67 м был зарегистрирован поток газовых струй, выходящих на поверхность моря. Наблюдения показали, что концентрация ртути в придонном слое воды более чем в 7 раз превышала содержание ртути на фоновой станции (44° 56.100 с. ш. - 32° 00.067 в. д.). Содержание ртути в придонной воде и донных осадках в северо-западной части моря с площадок газовых выходов с глубин 60 - 100 м в 54-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (7 - 15 декабря 1999 г.) также было в несколько раз выше, чем в воде поверхностного горизонта и на фоновых станциях. Результаты измерений ртути в 56-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» в июле 2001 г. в районах газовых выходов и местах

локализации грязевых вулканов на больших глубинах показаны в табл. 3.

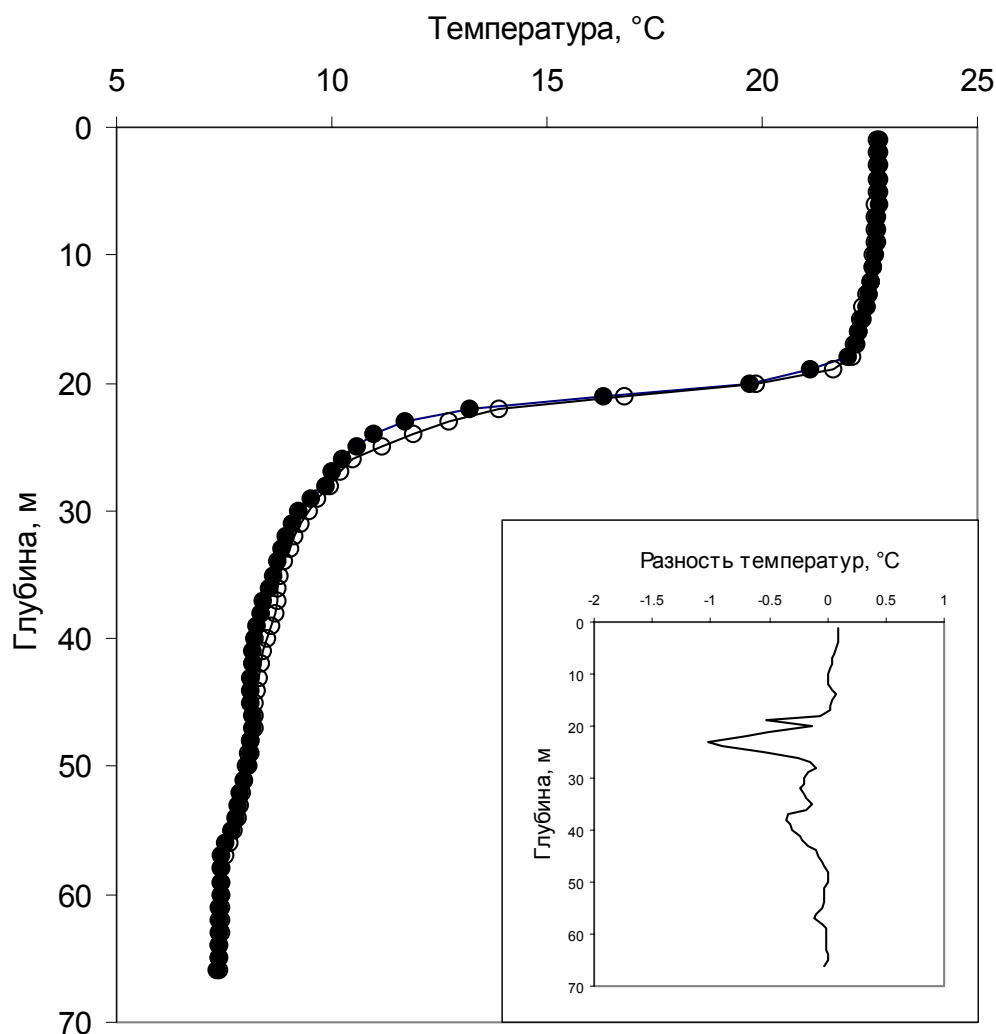


Рис. 7. Температурные профили: данные зондирования температуры в струях газовыделений (●) и за их пределами (○). На врезке — разность между усредненными профилями температуры в струях и за их пределами

Fig. 7. The CTD measurements of waters in thermocline over the seeps (●) in comparison with the surrounded areas (○). In the breakout — difference between averaged temperature profiles in seeps and surrounded area

Из представленных в табл. 3 данных видно, что концентрация ртути в местах газовой разгрузки со дна значительно превышала содержание ртути в смежных акваториях.

Как известно, в местах проявления грязевого вулканизма в черноморском регионе отмечались поступления ртути в окружающую среду [15]. Полученные нами данные свидетельствуют, что ртуть сопутствует как районам грязевого вулканизма, так и в целом местам газовой разгрузки недр.

Необходимо отметить, что в составе общей ртути в пробах воды, отобранных в районах газовыделений, преобладала раство-

ренная форма. Ранее в экспериментах по изучению трансформации физико-химических форм ртути было установлено, что в редокс зоне Черного моря в результате процессов химических взаимодействий происходит превращение растворенной формы ртути во взвешенную [13]. Очевидно, поступление метана со дна в водную толщу Черного моря оказывает существенное влияние на трансформацию физико-химических форм ртути.

Как известно, в Черном море формируются звуко рассеивающие слои (ЗРС), которые обусловлены расположением

Таблица 3. Содержание ртути в воде и донных отложениях Черного моря (56 рейс НИС «Профессор Водяницкий» – 14-25 июля 2001 г.)
 Table 3. Mercury in water and sediments, Black Sea (56th Cruise of the RV “Professor Vodyanitskiy” 14-5 July 2001)

№ станции	Дата	Глубина дна, м	Глубина отбора проб, м	Координаты		Концентрация ртути в воде, нг/л			Концентрация ртути в донных осадках, нг/г	Примечания
				С. ш.	В. д.	Растворенная форма	Взвешенная форма	Общая форма		
5552	15.07	52	0	45°17.820	31°43.530	5	5	10	7	Вне полей газовыделений
			52							
5558	15.07	30	0	45°43.000	31°00.710	103	22	125	65	Буровые
			30							
5574	20.07	1864	1	43°37.000	31°42.000	20	2	22	90	Метановые силы
			156							
			1836							
			1839							
			1844							
			1851							
			1859							
			1864							
5576	20.07	1868	0	43°37.700	31°42.370	38	37	75	-	Грязевой вулкан
			1850							
5580	21.07	1703	0	43°17.000	31°28.370	2630	46	2676	236	
			1703							
5583	22.07	1768	0	44°23.970	33°01.000	4	8	12	16	Вне полей газовыделений
			1768							
5590	24.07	1568	0	44°27.700	32°47.200	9	8	17	7	Вне полей газовыделений
			1568							
						78	42	120	161-186	Метановые силы, бактериальные постройки

терригенных взвесей и детрита на градиентных слоях плотности вод, обитанием в фотической и окислительной зоне фито- и зоопланктона, и, в значительной степени, личинок и взрослых рыб. Наблюдения показали, что струйные метановые газовыделения могут

влиять на структуру ЗРС. Регистрировались факторы влияния метановых сипов на непрерывность и сгущенность звукорассеивающих слоев [28], а также искажения тренда изменения структуры ЗРС, обусловленного воздействием внутренних волн (рис. 8).

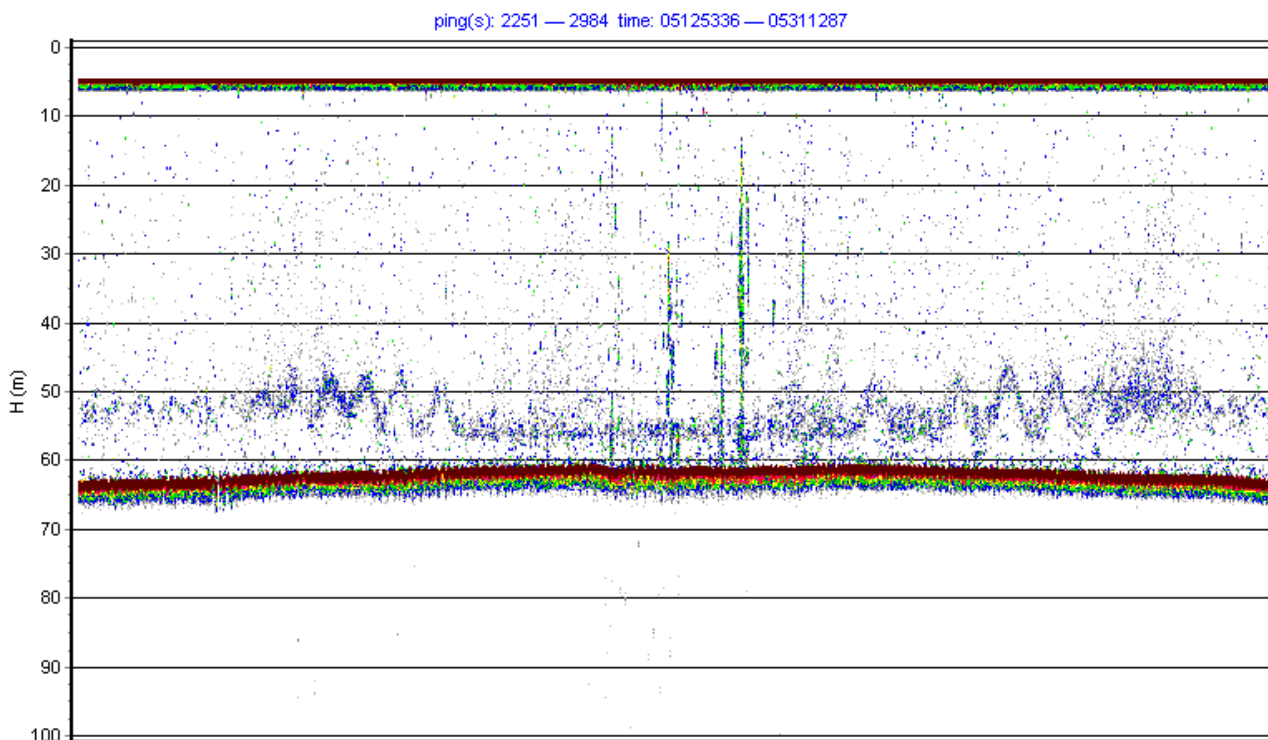


Рис. 8. Изменение структуры звукорассеивающих слоев под воздействием струйных метановых газовыделений и внутренних волн

Fig. 8. Anomaly of the back-scattering layers under the influence of gas bubble streams and inner waves

Обнаруженные эффекты могут быть вызваны физическим перемещением или «распугиванием» животных в слое ЗРС при прохождении через него газовых струй. С другой стороны, они могут быть объяснены тем, что с направленными к поверхности потоками струйного газа могут вовлекаться в направлении генерального движения вод дополнительные стационарные мелкомасштабные потоки биогенных элементов, которые обеспечивают прирост первичной продуктивности и обуславливают возникновение локальных зон с повышенной трофностью вод, регистрируе-

мых эхолотом в виде зон с повышенной сгущенностью ЗРС.

Одной из причин объяснения эффекта сгущения ЗРС в районах газовыделений может быть также увеличение трофности вод за счет повышенной продукции хемосинтеза метанокисляющих бактерий. Об этом свидетельствуют данные исследований сотрудников Института геологических наук и Института микробиологии и вирусологии АН УССР, выявивших связь между районами газовыделений иполями пространственно совпадающих с ними локальных концентраций метанокис-

ляющих бактерий [2].

Другим свидетельством справедливости выдвинутых гипотез являются обнаружение сотрудниками Центра аэрокосмических исследований земли Института геологических наук АН УССР В. М. Перерва, В. И. Лялько и В. Е. Филлиповичем (личн. сообщ., 1996 г.) «холодных аномалий» поверхностных вод, расположенных в пределах северо-западного шельфа Черного моря в местах с повышенным потоком легких углеводородов. В то же время следует отметить, что на современном уровне знаний коррелятивную связь между гущенностью ЗРС и интенсивностью струйных метановых газовыделений, по нашему мнению, нельзя назвать однозначной, так как причиной возникновения повышенной мелкомасштабной трофности вод на свале глубин Черного моря в местах проявления струйных метановых газовыделений могут быть также локальные микроапвеллинги, обусловленные поднятием обогащенных биогенными элементами вод при взаимодействии потока Основного Черноморского течения с переменным по глубине профилем дна.

По данным исследований Института геологических наук АН УССР, гранулометрический и химический состав донных осадков

не отличался от соответствующих характеристик смежных акваторий [2]. Повсеместно, как в окислительной, так и в восстановительной зонах Черного моря, площадки газовыделений покрыты бактериальными матами. В составе бактерий в окислительной зоне были зарегистрированы метаноокисляющие бактерии родов *Methylobacter* и *Methylomonas* [6].

Во время подводной экспедиции на ПЛБ «Бентос-300» (декабрь 1990 г.) в районах струйных выходов метана, расположенных на кромке северо-западного шельфа и верхней части материкового склона Черного моря, были обнаружены массивные карбонатные образования в виде плит или коралловидных построек высотой до 3 м (рис. 9), верхняя часть которых имела кратеры для выхода газа и была покрыта бактериальными обрастаниями (рис. 10). Плиты и отдельные бактериальные маты прослеживались на глубинах от 60 - 70 до 100 - 150 м, а коралловидные постройки наблюдались глубже 200 м, т.е. в сероводородной зоне [6, 9].

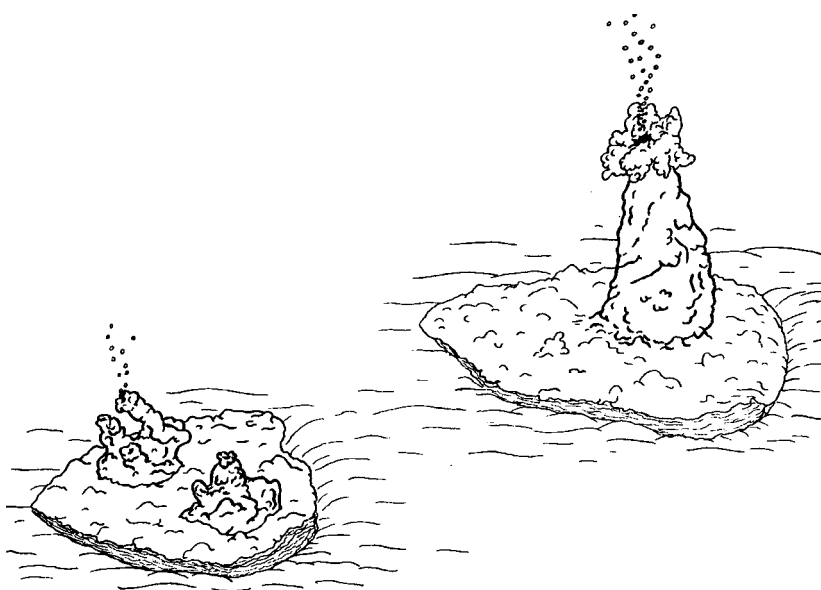


Рис. 9. Карбонатные постройки, обнаруженные в местах струйных выходов метана на кромке шельфа (слева, глубина 150 – 200 м) и материковом склоне (справа, глубина 230 м) северо-западной части Черного моря. Рисунок выполнен по результатам наблюдений из научно-исследовательской подводной лодки «Бентос – 300» в декабре 1990 г.
Fig. 9. Carbonate chimneys discovered in the active seepage areas: at the slope edge (left, 150-200 m) and at the continental slope (right, 230 m water depth) in the NW Black Sea during the expedition on board the scientific submarine “Bentos-300” in December 1999

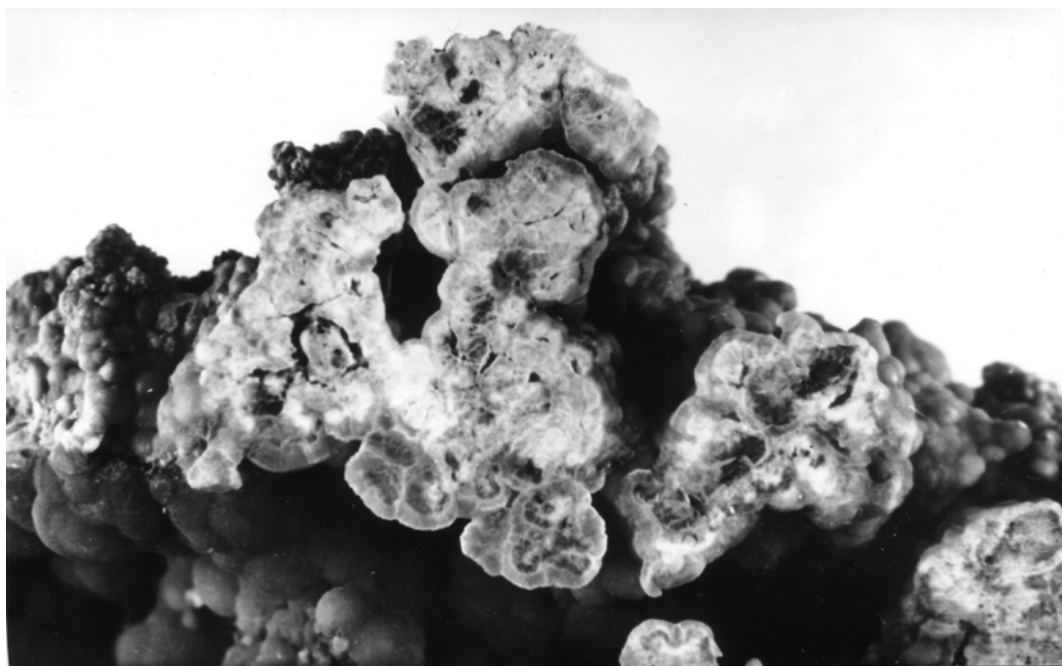


Рис. 10. Фрагмент верхней части карбонатной постройки с бактериальными обрастаниями, отобранной в районе высачивая метана на материковом склоне северо-западной части Черного моря (глубина 230 м) с борта научно-исследовательской подводной лодки «Бентос-300» в декабре 1990 г. (масштаб 1:1)

Fig. 10. Fragments of the upper part of chimney covered by bacterial mat collected at the continental slope seepage area in the NW Black Sea (230 m water depth) during the expedition on board the scientific submarine "Bentos-300" in December 1999. (Scale 1:1)

Позже сходные карбонатные образования были обнаружены на глубинах около 1800 м во время погружений глубоководного подводного аппарата «Север-2» юго-западнее Крымского п-ова [17]. Последующее драгирование дна, проведенное в этом районе во время 56-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» (июль 2001 г.), позволило поднять с глубины 1555 м образцы карбонатной постройки высотой более 1 м, верхняя часть которой также была покрыта бактериальным матом толщиной до 2 см.

Химические, изотопные и микробиологические исследования образцов, поднятых с глубины 230 и 1555 м, показали, что карбонатные постройки имеют биогенное происхождение, а их формирование обусловлено бактериальным окислением метана, просачивающегося из дна моря [5, 9, 11, 16]. Этот вывод был сделан, прежде всего, на основании ре-

зультатов измерений изотопного состава углерода бактериальных матов и карбонатного материала построек. Оказалось, что органическое вещество бактериальных матов отличается чрезвычайно высоким содержанием легкого изотопа углерода. Величина $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ составила в этих образцах от -79.7 ‰ (глубина 230 м) до -80.8 ‰ (глубина 1555 м), тогда как типичные значения дисперсии ^{13}C в морском органическом веществе равны примерно $-15 \div -22$ ‰ [5]. В карбонатном материале построек относительное содержание легкого изотопа углерода составило -36.5 ‰ на глубине 230 м и -35.5 ‰ на глубине 1555 м [5, 16]. Эти величины являются промежуточными по сравнению с упомянутыми выше бактериальными матами и бикарбонатами морской воды, у которых величина $\delta^{13}\text{C}$ в водной толще Черного моря составляет от -2 ‰ на глубине 200 м до -6.3 ‰ в придонном слое глубоководной котловины

[26]. Полученные значения $\delta^{13}\text{C}$ в карбонатах бактериальных построек свидетельствуют о том, что они были сформированы метанооксиляющими бактериями примерно в равных долях за счет углерода метана, высачивающегося из донных отложений ($\delta^{13}\text{C} = -58.2 \text{‰} \div -70.5 \text{‰}$), и бикарбонатов, растворенных в морской воде ($\delta^{13}\text{C} = -2 \text{‰} \div -6.3 \text{‰}$) [11]. Следует отметить, что обе исследованные постройки располагались в сероводородной зоне Черного моря. В настоящее время активно обсуждается вопрос о возможных механизмах анаэробного метаноокисления [5, 30]. Наиболее вероятной считается следующая схема окисления метана,

осуществляемого специфическими сульфатредуцирующими археобактериями:



Как видно из этой схемы, образование карбонатного материала постройки должно происходить с использованием бактериями эквивалентных количеств углерода метана и бикарбонатов морской воды.

С помощью радиоуглеродной методики был измерен возраст фрагментов бактериальных построек, поднятых с различных глубин Черного моря (табл. 4).

Таблица 4. Радиоуглеродный возраст (годы) карбонатного материала бактериальных построек на различных глубинах материкового склона северо-западной части Черного моря

Table 4. Radiocarbon age (years) of carbonate material of bacterial chimneys collected within the NW Black Sea continental slope area at different depths

Образец \ Глубина дна	230 м	1120 м	1555 м	1738 м
Средняя часть постройки	3400 ± 105	8500 ± 120	9800 ± 700	15150 ± 380
Основание постройки	5100 ± 150	9200 ± 200	13800 ± 300	17500 ± 540

Оказалось, что с ростом глубины радиоуглеродный возраст построек увеличивается [16, 29]. По-видимому, это отражает многолетнюю динамику подъема верхней границы сероводородной зоны Черного моря, поскольку, как указывалось выше, крупные кораллоподобные постройки обнаружены глубже 200 м, а их формирование происходит за счет анаэробного бактериального метаноокисления.

Рассматривая средообразующую и экологическую роль струйных метановых газовыделений в Черном море, нельзя не коснуться проблемы генезиса метана, так как это напрямую связано с перспективностью поиска приуроченности полей метановых сипов к углеводородным месторождениям. В настоящее время имеются две точки зрения на источник метана в струйных газовыделениях. Согласно первой из них – геологической гипотезе, ут-

верждается, что дегазация недр в Черном море обеспечивается газовыми месторождениями через систему геологических разломов и (или) через промежуточное звено – залежи газогидратов в донных отложениях, возникших как следствие газовой разгрузки углеводородных месторождений. Вторая – биогеохимическая гипотеза - связана с утверждением о биогенном происхождении метана струйных газовыделений.

Аргументами сторонников геологической гипотезы являются прогнозные оценки высокой общей перспективной газоносности региона, наличие на шельфе Черного моря в непосредственной близости от полей струйных метановых газовыделений уже обнаруженных газовых месторождений, а также оценки потока метана с полей газовыделений,

интенсивность которых нельзя объяснить только потоком биогенного метана [18].

В то же время, масс-спектрометрические исследования проб газа (глубины 64 - 371 м) позволили установить, что метан в струйных газовыделениях Черного моря отличается высоким содержанием легкого изотопа углерода. Величины дисперсии $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ в этих пробах составили от -58.2 ‰ [5] до -70.5 ‰ [7, 30], что свидетельствует о биогенном происхождении метана в процессе диагенеза донных отложений, протекающем при активном участии метанобразующих бактерий [7].

Оценки потенциальной газовой разгрузки с полей газовыделений с помощью видеотехники и водолазных работ показали, что с одного квадратного метра площади дна Черного моря может исходить до 20 струй, с общим потоком газа до 80 мл с^{-1} или $6.9 \text{ м}^3 \text{ сут}^{-1}$ [14]. По современным данным [25], максимальный поток газа с одной струи может достигать $7.2 \text{ м}^3 \text{ сут}^{-1}$. В местах с высокой интенсивностью дегазации недр поток метана с площадки в 0.1 км^2 может составлять $170000 \text{ м}^3 \text{ сут}^{-1}$ или $1.7 \text{ м}^3 \text{ сут}^{-1}$ [14]. В то же время при большом масштабе осреднения по площади (см. табл.1) удельный поток газовыделений составляет $262 \text{ м}^3 \text{ км}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ или не превышает $0.1 \text{ м}^3 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

За весь период новой истории Черного моря (7000 лет [22]) для поддержания интенсивности газовыделений в $0.1 \text{ м}^3 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ потребовалось бы в среднем 700 м^3 газа с 1 м^2 поверхности полей газовыделений. При удельной газоемкости газовых гидратов, равной 224 м^3 метана на 1 м^3 газовых гидратов, для поддержания непрерывности газовыделений в течение всего новейшего периода истории Черного моря потребовалась бы дегазация слоя газовых гидратов толщиной в 3 м, что является вполне реальным. Таким образом, на настоящем этапе исследований гипотеза о

биогеохимическом механизме газовой разгрузки в изученных регионах Черного моря в пределах глубин до 370 м не противоречит наблюдениям.

Имеются данные о высокой коррелированности струйных метановых газовыделений с локализацией углеводородных месторождений. Это относится, в первую очередь, к акваториям Северного моря и Мексиканского залива [20, 21]. Как известно, в настоящее время отсутствуют сведения о получении проб метана с площадок газовыделений в Черном море с высоким содержанием тяжелого изотопа углерода. Тем не менее, по нашему мнению, дальнейшие исследования по проблеме изучения струйных метановых газовыделений, охватывающие наиболее полно акваторию Черного моря, включая места развитого грязевого вулканизма и геологически динамичные структуры, позволят реализовать гипотезу о высокой газоносности региона.

Заключение. 1. Струйные газовыделения занимают значительные площади на акватории Черного моря в районах русел и палеорусел рек, на свале глубин и в местах проявления грязевого вулканизма. Существование обнаруженных в последние годы в Черном море струйных газовыделений с глубин более 750 м не может быть объяснено в рамках современных теоретических концепций об устойчивости газовых гидратов. **2.** В состав газовыделений в основном входит метан и его гомологи. Поток метана от отдельных струй может достигать $6.8\text{--}7.2 \text{ м}^3 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, а с отдельных площадок максимально до $1.7 \text{ м}^3 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. В западной части Черного моря газовая разгрузка не превышает $0.1 \text{ м}^3 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. Поток метана со дна северо-западной части моря оцениваются в $5.2 \cdot 10^8 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$, а в западной части $2.2 \cdot 10^9 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$. В отношении генезиса метана нет единой точки зрения. На настоящем этапе исследований не противоречит наблюдениям

гипотеза о биогенном происхождении метана газовой выделений с глубин до 370 м за счет диагенеза донных отложений, протекающих при активном участии метанобразующих бактерий.

3. В местах газовой разгрузки гидрологические характеристики плотность и соленость вод не изменяются. Непосредственно в местах выхода газа с малых глубин может изменяться Eh и температура в летнем термоклине. В районах метановых сипов в воду поступает ртуть и в следовых количествах может поступать сероводород. Газовые струи могут доставлять в слой фотосинтеза биогенные элементы, обуславливая возникновение локальных зон повышения трофности вод в результате повышения продукции хемо- и фотосинтеза. Зоны повышенной трофности вод могут приводить к увеличению плотности звуко рассеивающих слоев моря. **4.** В районах струйных выходов метана, расположенных на кромке шельфа и материковом склоне Черного моря, обнаруже-

ны карбонатные образования в виде плит или коралловидных построек, верхняя часть которых имеет отверстия для выхода газа и покрыта бактериальными обрастаниями. Отмечена ярусность в локализации этих образований: плиты и отдельные бактериальные маты прослеживаются на глубинах от 60 - 70 до 100 - 150 м, а коралловидные постройки расположены глубже 200 м, в зоне сероводородного заражения водной толщи. Формирование глубоководных построек происходит за счет анаэробного окисления метана с участием сульфатредуцирующих археобактерий, использующих эквимолярные количества метана и бикарбонатов морской воды для образования карбонатного материала. **5.** Радиоуглеродный возраст бактериальных построек увеличивается с ростом глубины их расположения. Это, очевидно, отражает динамику формирования сероводородной зоны в водной толще Черного моря.

1. *Геворкьян В. Х., Бураков В. И., Исагулова Ю. К.* и др. Газовыделяющие постройки на дне северо-западной части Черного моря // Докл. АН УССР. – 1991. – № 4. – С. 80 – 85.
2. *Геворкьян В. Х., Бураков В. И., Семенов Д. В.* и др. Геологические исследования поля газовой выделений в северо-западной части Черного моря / Отчет ИГН АН УССР об участии в 33-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий», июль-август 1990 г. 1990, 29 с.
3. *Егоров В. Н., Поликарпов Г. Г., Гулин М. Б.* и др. Влияние струйных метановых газовой выделений из дна Черного моря на мелкомасштабные процессы вертикального перемешивания вод // Доп. НАНУ. – 1999. – № 8. – С. 186 – 190.
4. *Ефремова А. Г., Жиченко В. Р.* Обнаружение кристаллогидратов в осадках современных акваторий // Докл. АН СССР. – 1974. – 214 (5). – С. 1179 – 1181.
5. *Иванов М. В., Поликарпов Г. Г., Леин А. Ю.* и др. Биогеохимия цикла углерода в районе метановых газовой выделений Черного моря // Докл. АН СССР. – 1991. – 3, № 5. – С. 1235 – 1240.
6. *Иванов М. К., Конюхов А. И., Кульницкий Л. М.* и др. Грязевые вулканы в глубоководной части Черного моря // Вест. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. – 1989. – № 3. – С. 48 – 54.
7. *Леин А. Ю., Иванов М. В., Пименов Н. В.* Генезис метана холодных метановых сипов днепровского каньона в Черном море // Докл. РАН. – 2002. – 387, № 2. – С. 242 – 244.
8. *Поликарпов Г. Г., Егоров В. М.* Виявлено активні газовиділення з дна Чорного моря // Вісн. АН УРСР. – 1989. – № 10. – С. 108 – 111.
9. *Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н., Гулин С. Б.* и др. Газовыделения со дна Черного моря - новый объект молисмологии // Молисмология Черного моря. – Киев: Наук. думка, 1992. – С. 5 – 10.
10. *Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н., Нежданов А. И.* и др. Явление активного газовой выделения из поднятий на свале глубин западной части Черного моря // Докл. АН УССР. – 1989. – Сер. Б, № 12. – С. 13 – 15.
11. *Поликарпов Г. Г., Иванов В. Н., Гулин С. Б., Гулин М. Б.* Депонирование углерода метана в

- карбонатных бактериальных постройках на свале глубин сероводородной зоны Черного моря // Докл. НАН Украины. – 1993. – № 7. – С. 93 – 94.
12. *Рязанов А. К.* Газ и газовые туманы на шельфе Черного моря // Докл. АН УССР. – 1996. – № 4. – С. 90 – 94.
 13. *Светашева С. К., Егоров В. Н., Гулин М. Б., Жерко Н. В.* Трансформация физико-химических форм ртути и ее распределение в аэробной и анаэробной зонах Черного моря // Молисмология Черного моря. – Киев: Наук. думка, 1992. – С. 108 – 121.
 14. *Ткешелашвили Г. И., Егоров В. Н., Мествиришвили Ш. А.* и др. Метановые газовыделения со дна Черного моря в приустьевой зоне реки Супса у побережья Грузии // Геохимия. – 1997. – № 3. – С. 331 – 335.
 15. *Шнюков Е. Ф.* Грязевой вулканизм в Черном море // Геологич. журн. – 1999. – № 2. – С. 38 – 47.
 16. *Шнюков Е. Ф., Леин А. Ю., Егоров В. Н.* и др. Обнаружение в Черном море глубоководных построек биогенного происхождения // Докл. НАН Украины. – 2003. – в печати.
 17. *Шнюков Е. Ф., Соболевский Ю. В., Кутний В. А.* Необычные карбонатные постройки континентального склона северо-западной части Черного моря – вероятное следствие дегазации недр // Литология и полезные ископаемые. – 1995. – № 5. – С. 541 – 561.
 18. *Шнюков Е. Ф., Старостенко В. И., Гожик П. Ф.* и др. О газоотдаче дна Черного моря // Геологич. журн. – 2001. – С. 7 – 14.
 19. *Artemov Yu. G.* Acoustic observations of gas bubble streams in the nw black sea as a method for estimation of gas flux from vent sites. European Geophysical Society // Geophysical Research Abstracts. – 2003. – 5. – P. 09421.
 20. *Bange H. W., Bartell U. H., Rapsomanikis S., Andrae M.O.* Methane in the Baltic and North Seas and a reassessment of the marine emissions of methane // Global biogeochemical cycles. – 1994. – 4. – P.465 – 480.
 21. *Brooks J. M., Reid D. F., Bernard B. B.* Methane in the upper water column of the northwestern Gulf of Mexico // J. Geophys. Res. – 1981. – 86. – P. 11,029 – 11,040.
 22. *Cagatay N. M.* Geochemistry of the late Pleistocene-Holocene sediments of the Black Sea: an overview / Environment degradation of the Black Sea: Challenges and Remedies. Kluwer Acad. Publ., the Netherlands. – 1999. – P. 9 – 22.
 23. *Dando P. R., Hovland M.* Environmental effects of submarine seeping natural gas // Continental Shelf Research. – 1992. – 12 (10). – P. 1197 – 1207.
 24. *Dimitrov L. I.* Characteristics of gas-acoustic anomalies on the South Bulgarian Black Sea shelf // Oceanology. – 1989. – 19. – P. 34 – 41. (in Bulgarian).
 25. *Dimitrov, L.* Contribution to atmospheric methane by natural gas seepages on the Bulgarian continental shelf // Continental Shelf Researches. – 2002. – 22. – P. 2429 – 2442.
 26. *Fry B., Jannasch H. W., Molyneaux S. J.* et al. Stable isotope studies of the carbon, nitrogen and sulfur cycles in the Black Sea and the Cariaco Trench // Deep-Sea Research. – 1991. – 38 (suppl. 2). – P. 1003 – 1019.
 27. *Ginsburg G. D., Soloviev V. A.* Submarine gas hydrates // VNII Okeangeologia. - St. Petersburg. – 1998. – 216 p.
 28. *Gulin M. B., Gulina T. E.* Anomalies in the zooplankton layer distribution over gas seep areas in the Black Sea / Methane Gas Seep Explorations in the Black Sea (MEGASEEBS), Project Report. Klimaforsch. Univ. Hamburg, 1998. – 14. – P. 79 – 88.
 29. *Gulin S. B., Polikarpov G. G., Egorov V. N.* Estimation of age of the microbial carbonate structures grown at methane. European Geophysical Society // Geophysical Research Abstracts. – 2003. – 5. - P. 14662.
 30. *Michaelis W., Seifert R., Nauhaus K.* et al. Microbial reefs in the Black Sea fuelled by anaerobic oxidation of methane // Science. – 2002. – 297. – P. 1013 – 1015.
 31. *Reeburgh W. S., Ward B. B., Whalen S. C.* et al. Black Sea methane geochemistry / Deep-Sea Research. – 1991. – 38 (Suppl. Issue № 2A). – P. 1189 – 1210.

32. *Reeburgh W. S., Ward B. B., Whalen S. C. et al.* Black Sea methane geochemistry / Deep-Sea Research. – 1991. – **38** (Supplementary Issue № 2A). – P. S1189 – S1210.
33. *Sideridis G. A., Kastrinakis E. G., Nychas S. G., Rapsomanikis S.* An experimental facility to simulate greenhouse gases release and dispersion from the black Sea International / Conference for the Protection and Restoration of the Environment, Thassos Greece, July 2000. – 2000. – P. 938 – 944.
34. *Sloan E. D.* Clathrate hydrates of natural gases (2nd ed.) // Chem. Ind. Marcel Decker, New York. – 1998. – **139**. – 705 p.

Поступила 20 августа 2003 г.

Modern conception about forming-casting and ecological role of methane gas seeps from bottom of the Black Sea. V. M. Egorov, G. G. Polikarpov, S. B. Gulin, Ju. G. Artemov, M. A. Stokozov, S. K. Kostova. Results of investigations are summarized concerning the recently discovered in the Black Sea phenomenon of methane gas bubble streams. The generalized location map of observed gas bubble streams in the Black Sea is shown, statistics of water depth at seepage areas and the vertical extension of gas bubble streams in water column are adduced. Data on physical-chemical properties of gas bubbles are outlined, including gas composition, size distribution, velocity of emersion and evaluation of area averaged methane flux into the water column as well. Analyzes is done on methane seeps influence upon primary production, back-scattering layers and physical-chemical transformation of mercury forms. Data are discussed obtained from chemical, isotopic and microbiological investigations of plate and coral-like carbonate chimneys collected at the seepage areas. Genesis of methane in the Black Sea is examined in view of a question regarding the prospects for hydrocarbon deposit in the basin.

Keywords: the Black Sea, gas bubble streams, methane flux, carbonate chimneys, bacterial mats, radiocarbon age

Сучасні уявлення щодо екологічної ролі метанових газовиділень з дна Чорного моря. В. М. Єгоров, Г. Г. Полікарпов, С. Б. Гулін, Ю. Г. Артёмов, М. А. Стокозов, С. К. Костова. Представлено узагальнення сучасного рівня досліджень струминних метанових газовиділень у Чорному морі. Приводиться карта локалізації полів газовиділень у Чорному морі, а також поширення метанових сипів за глибиною і вертикальною довжиною газових струменів. Описано фізико-хімічні характеристики пухирців — склад газу, розміри, швидкість підйому, а також осереднені за площею дна оцінки потоку метану у водяну товщу. Аналізуються дані про вплив метанових сипів на біологічну продуктивність вод, структуру звукорозсіювачих шарів (ЗРС) і трансформацію фізико-хімічних форм ртуті. Обговорюються результати хімічних, ізотопних і мікробіологічних досліджень карбонатних споруд у місцях струминних виходів метану. Розглядаються питання генезису метану у Чорному морі у зв'язку з перспективністю регіону у відношенні вуглеводневих родовищ.

Ключові слова: Чорне море, струминні метанові газовиділення, потік метану, карбонатні споруди, бактеріальні мати, радіовуглерідний вік