

От Редакции

Публикуемая ниже статья является результатом многолетних исследований коллектива авторов и посвящена проблеме возможного влияния метана на морские экосистемы, а также решения обратной задачи поиска газовых углеводородных скоплений под морским дном, используя изменения в экосистемах в качестве поискового признака.

Учитывая несомненную важность этой проблемы, Редакция журнала приняла решение удовлетворить просьбу авторов и опубликовать статью, в порядке исключения, без сокращения, не смотря на ее значительный, по меркам журнала, объем.

В.В. Янко^{1, 2}, С.В. Кадурин¹, А.О. Кравчук¹, И.И. Кулакова³

¹ Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Одесса

² Авалон институт прикладных наук, Виннипег, Канада

³ Институт морской биологии НАН Украины, Одесса

МЕЙОБЕНТОС КАК ПОИСКОВЫЙ ПРИЗНАК СКОПЛЕНИЙ ГАЗОБРАЗНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЧЕРНОГО МОРЯ

В данной работе рассматривается связь между распределением мейобентоса и концентрациями углеводородных газов. На основании сопряженного анализа абиотических (физико-химические параметры водной толщи, геохимические, литологические, минералогические свойства донных отложений) и биотических (количественный и таксономический состав фораминифер, нематод, остракод) параметров сделан вывод о возможности использования мейобентоса в качестве поискового признака скоплений углеводородных газов и, в первую очередь, метана в донных отложениях северо-западной части Черного моря.

Ключевые слова: мейобентос, донные отложения, Черное море, экосистема, фораминиферы.

Введение

В водах Черного моря растворено порядка 80 млрд м³ метана, несмотря на полный цикл обновления воды каждые 400–2000 лет. Это свидетельствует о мощном постоянном подтоке углеводородных газов (УВГ), а значит – наличии их резервуаров под морским дном [26]. Вертикальная миграция УВГ осуществляется по тектоническим нарушениям, которые формируют ослабленные зоны в осадочном чехле [2, 79, 80] и выполняют роль «дымоходов», или «вентиляционных шахт». По ним УВГ (и другие флюиды, например H₂S, CO₂) поднимаются к поверхности, насыщая донные отложения [27, 31, 36]. Газометрическая съемка УВГ, основы которой были

© В.В. ЯНКО, С.В. КАДУРИН,
А.О. КРАВЧУК, И.И. КУЛАКОВА, 2017

разработаны учеными кафедры общей и морской геологии ОНУ имени И.И.Мечникова под руководством Г.Г.Ткаченко позволила установить перспективные на УВГ тектонические структуры в северо-западной части Черного моря в 70-х годах XX в. Эти структуры представлены антиклиналями мелового-палеогенового возраста [27]; одна из них – поднятие Голицына, где в 1975 г. был получен первый фонтан газа на Черноморском шельфе Украины.

Проведенная на обширнейшем (тысячи проб донных осадков и придонной воды) фактическом материале съемка показала полное отсутствие связи между УВГ и литологией донных отложений. Вместе с тем она отчетливо продемонстрировала связь повышенных концентраций УВГ с определенными тектоническими структурами, что позволило сделать вывод об эпигенетичности УВГ [27] и их глубинном происхождении [31]. Сегодня очевидно, что происхождение метана в Черном море имеет двойную природу. С одной стороны, это так называемый ископаемый (глубинный) метан, выделяющийся из недр Земли, а с другой – биогенный метан, продукт бактериальной жизнедеятельности [25]. Эти два вида метана имеют ряд характерных различий, например, отсутствие гомологов в биогенном метане [11].

Биота на Земле существует только в условиях разграничения с литосферными флюидами. Осадочный чехол выполняет роль «заслонки», в местах нарушения в нем происходит разгрузка. Долгосрочный выброс метана в морскую среду влияет на состав и количественные характеристики биоты. На примере рыб было установлено, что быстрое проникновение метана в организм нарушает жизненные функции, отрицательно влияя на дыхание, нервную и кроветворную системы, ферментативную активность вплоть до летального исхода за относительно короткий промежуток времени [68]. Влияние метана на бентосные организмы изучено слабо. Есть немногочисленные и противоречивые данные по моллюскам Черного моря. Например, Г.Г. Поликарпов и др. указывают, что метан не оказывает воздействия на пространственное распределение моллюска *Mytilus phaseolinus* в северо-западной части Черного моря в диапазоне глубин 60–256 м [71], в то время как П. В. Люшвин говорит об обратном, базируясь на снижении добычи мидий в 3–5 раз при активизации сейсмической активности, в основном, на территории Румынии [13]. По утверждению других авторов, метан влияет на живые организмы, особенно если они обитают непосредственно на метановых сипах [60]. С этим согласны Г.Г. Сергеева и С.Б. Гулин, которые указывают на высокую плотность мейобентоса (нематод, полихет, аллогромиин) в районе холодных сипов рядом с подводным каньоном Днепровский (северо-западная часть Черного моря, глубина 182–308 м) [76]. Авторы связывают это с наличием микробных матов, на которых питается зообентос и которые формируются вокруг холодных газовых выходов. В то же время, С.Б. Гулин и др. отмечают, что микробные маты характеризуются чередованием неблагоприятных и благоприятных периодов для проникновения и пребывания зообентоса, которые связаны с определенными пороговыми уровнями кислорода и сероводорода [4]. В периоды активизации газовой выделений (или сипов) со дна видовое разнообразие зообентоса, найденного в пятнах сульфуретт, значительно обеднено по сравнению с фоновым районом. G. Panięci, изучавшая фораминифер метановых сипов Адриатического моря, отмечает резкое снижение численностей их популяций и видового разнообразия, а также присутствие там только видов-космополитов [67]. Kumar и Gupta (2005) изучали бен-

тосных фораминифер из Black Ridge, расположенного в северо-западной части Атлантического океана в 350 км от Южной Каролины в районе поля газогидратов [58]. Они указывают, что фауна здесь находится под колоссальным стрессом, обусловленным высоким содержанием метана в донных отложениях. Поэтому эписебентосные виды, приспособленные к жизни в условиях кислородной среды, здесь не выживают. Зато такая среда подходит некоторым эндобентосным видам, приспособленным к жизни в условиях дефицита кислорода и даже в аноксической или сульфидной среде [41, 75]. По нашим данным, влияние разных концентраций метана на донные экосистемы существенно отличается и гораздо сложнее, чем прежде предполагалось [34, 90].

Цель настоящей работы – выявление связи между распределением мейобентоса с твердыми раковинами (фораминиферы, остракоды) и без них (нематоды) и концентрацией УВГ в донных отложениях путем сопряженной газометрической, геохимической и мейобентосной съемки морского дна с учетом тектонических особенностей исследуемого района. Такая съемка отличается простотой методики, высокой продуктивностью и низкой стоимостью работ.

Для достижения поставленной цели в исследуемом районе решались следующие задачи:

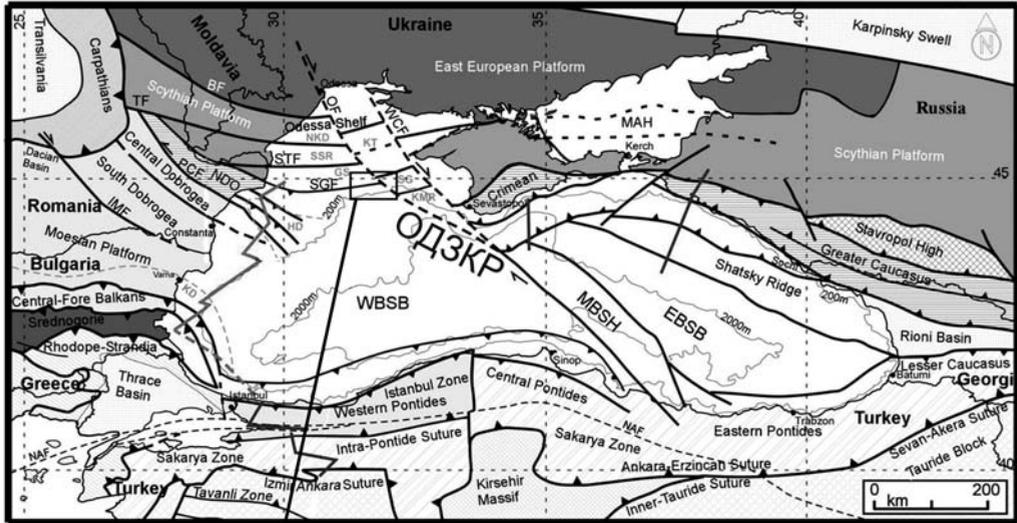
1. Определение тектонических особенностей морского дна.
2. Определение основных физико-химических параметров водной толщи с акцентом на придонную воду.
3. Определение литологических и геохимических характеристик донных отложений.
4. Определение состава и концентраций УВГ и CO_2 в донных отложениях.
5. Определение количественного и качественного (таксономического) распределения мейобентоса в донных отложениях.
6. Корреляция абиотических и биотических параметров, перечисленных в пунктах 1–5, интеграция полученных результатов, выведение общих закономерностей поведения биоты и их сравнение с другими морскими бассейнами.

Работа представляет собой продолжение исследований прошлых лет [27], но на новом уровне и с использованием современной аппаратуры и методов. Основной задачей предыдущих работ была разработка параметров выявления и изучения УВГ, абсорбированных донными отложениями при их вертикальной миграции от газонефтеносных пород глубокого залегания. Итогом явилось выделение геологических структур, перспективных на УВГ, из которых они сегодня добываются (поднятие Голицына). Представленная нами работа выводит на новый уровень морскую газометрическую съемку, дополняя ее исследованиями ответа биоты на УВГ в донных отложениях.

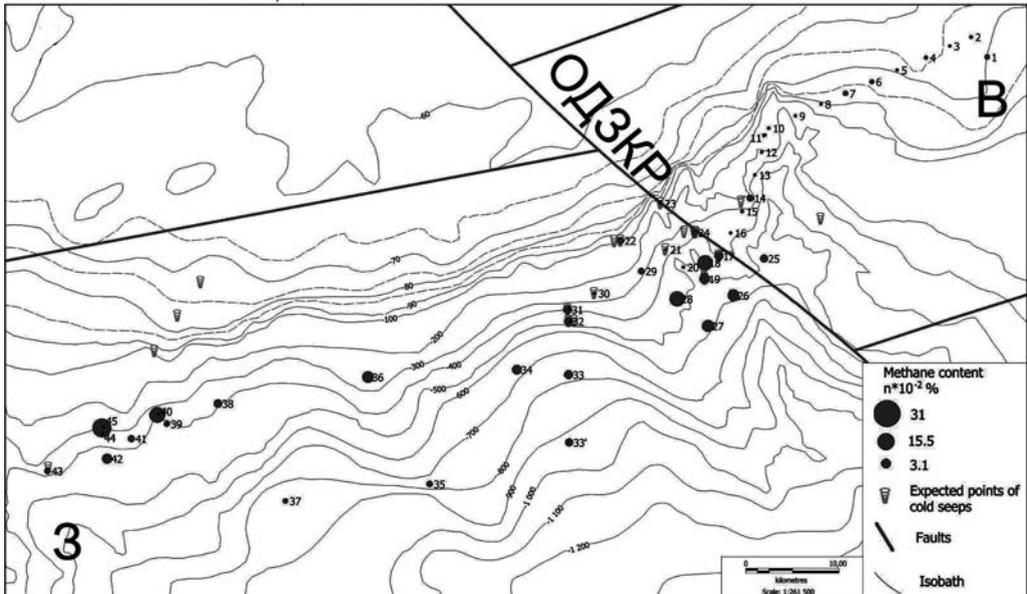
Актуальность работы заключается в ее фундаментальном и прикладном значении. С одной стороны, она способствует лучшему пониманию выживаемости биоты в экстремальных условиях, а с другой – обеспечивает дополнительный (контрольный) прогнозный критерий для поиска скоплений УВГ в морских условиях. С третьей стороны, распределение мейобентоса на морском дне само по себе становится важным поисковым признаком.

Район работ

Район работ располагается в центральной части северо-западного сектора Западно-Черноморской впадины в диапазоне глубин моря 70–905 м (рис. 1).



а



б

Рис. 1. а – Тектоническая карта Черного моря и сопредельных территорий [62]; б – район работ с положением Одесско-Западнокрымского (ОДЗКР=OF на рис. 1 а) диагонального разлома, разбивающего район исследования на западную (3) и восточную (в) части

Западночерноморская впадина (с корой субокеанического и океанического типа) отделяется от Восточночерноморской (с корой субокеанического и океанического типа в средней части и утонченной корой континентального типа по краям) валом Андрусова с континентальным типом коры [15, 49, 62]. Переходная зона Западночерноморская впадина – вал Андрусова осложнена системой разломов с падением как на запад, так и на восток под углами 30°–45° [7].

Западная граница, отделяющая вал Андрусова от Западночерноморской котловины, проходит по глубинному сдвиговому разлому диагонального (с северо-

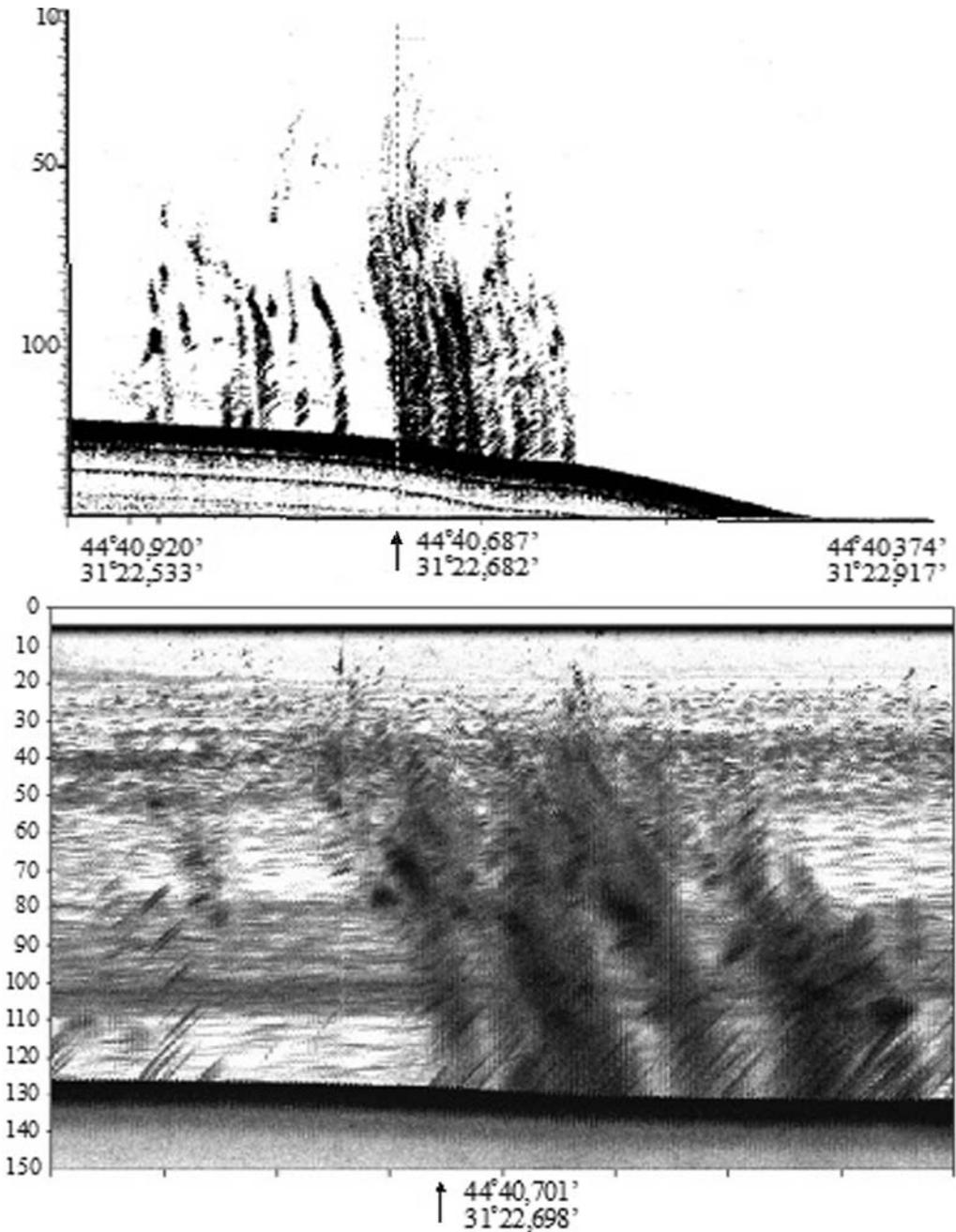


Рис. 2. Эхограммы газовых факелов, обнаруженных на границе шельф – континентальный склон [33] в районе станций 38 и 39 (табл. 1, рис. 1 б)

запада на юго-восток) простирания. В пределах северо-западного шельфа этот единый тектонический линеамент определяется как Одесский. При переходе в пределы континентального склона и глубоководной впадины он трансформируется в Западнокрымский [48, 49], и поэтому для него принята в работе аббревиатура ОДЗКР (рис. 1 а, б).

К ОДЗКР с западной стороны примыкает серия субширотных разломов более мелкого порядка сбросового типа, определяющих переход от шельфа к континентальному склону [17, 31, 48, 49]. Своим присутствием они обязаны тектоническому растяжению Западночерноморской впадины и представляют собой своеобразные «дымоходы», по которым поднимаются фильтрационные потоки УВГ и других флюидов [2, 80]. Доказательством таких потоков служат газовые факелы, зафиксированные в районе работ (рис. 2).

ОДЗКР разбивает район работ на восточную и западную части (рис. 1 б). Восточная часть лежит в области внешнего шельфа, а западная включает также континентальный склон. Обе части рассматриваются в работе отдельно и сравниваются между собой.

Материал и методы

Направление движения по рейсу и положение станций опробования разработаны в полном соответствии со схемой расположения и координатами холодных сипов, приведенных в работе В.Н. Егорова и др. [6] (рис. 3).

Станции опробования распланированы таким образом, чтобы захватить ответ биоты на разные обстановки осадконакопления. Маршрут движения судна начат в шельфовой зоне на расстоянии 23 км к востоку от ОДЗКР, где опробовано 16 станций (№ 1–15, 23) в интервале глубин 71–170 м. Дальнейший маршрут проложен на запад от ОДЗКР приблизительно по траверсу Днепровского каньона до края шельфа и далее по континентальному склону. Здесь опробовано 30 станций (№ 16–22, 24–45) в интервале глубин 86–905 м, из них почти половина станций (№ 22, 24, 29, 30, 31, 36, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45) расположена на внешнем шельфе, т. е. в таком же диапазоне глубин, как и на востоке от ОДЗКР.

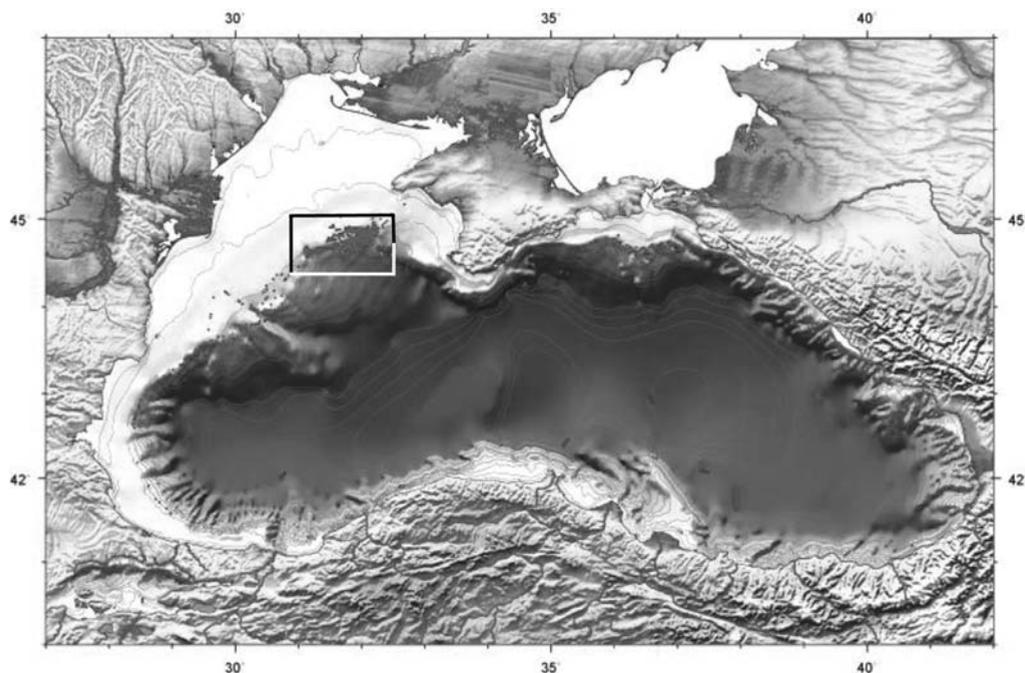


Рис. 3. Карта распределения метановых сипов в Черном море [6]. Прямоугольником обозначен район работ, указанный на рис. 1 б

Таблица 1. Координаты и глубина опробованных станций

№ станции*	Долгота, В	Широта, С	Глубина моря, м
Станции, расположенные к востоку от ОДЗКР			
1	32.49639	45.03083	77
2	32.47444	45.05028	78
3	32.44533	45.04148	75
4	32.41285	45.03017	72
5	32.37367	45.01823	71
6	32.33918	45.00691	77
7	32.30335	44.99546	86
8	32.2702	44.98507	96
9	32.23504	44.97363	97
10	32.19921	44.9618	97
11	32.19385	44.95515	100
12	32.18916	44.93855	100
13	32.18012	44.91642	110
14	32.17376	44.8939	167
15	32.16304	44.88109	170
23	32.05167	44.88889	75
Станции, расположенные к западу от ОДЗКР			
16	32.1473	44.86035	270
17	32.1311	44.83777	340
18	32.11214	44.83123	328
19	32.11194	44.81583	500
20	32.08301	44.8272	303
21	32.05923	44.84418	320
22	31.99722	44.85278	86
24	32.0975	44.86056	208
25	32.19277	44.83541	603
26	32.15111	44.79944	470
27	32.11649	44.76992	600
28	32.0744	44.79634	365
29	32.02578	44.82323	186
30	31.96167	44.80167	106
31	31.92528	44.78583	186
32	31.92667	44.77444	334
33	31.92686	44.72274	655
33*	31.92753	44.6571	905
34	31.85644	44.72773	620
35	31.7379	44.6169	643
36	31.65374	44.7204	109
37	31.54174	44.60024	746
38	31.44987	44.69469	192
39	31.38	44.675	143
40	31.3674	44.68356	112
41	31.3319	44.66077	190
42	31.29909	44.6413	234
43	31.21805	44.62943	195
44	31.29105	44.66599	113
45	31.29172	44.67119	107

Работы проведены с борта украинского НИС «Владимир Паршин» в период с 19 по 27 сентября 2008 г. в рамках проекта Шестой Европейской Рамочной Программы HERMES “Hotspot Ecosystem Research on the Margins of European Seas”. Всего опробовано 46 станций. Их координаты и глубина указаны в таблице 1 (жирным шрифтом обозначены станции, расположенные на шельфе).

На станциях сделаны промеры водной толщи для определения ее физико-химических характеристик. Пробы воды взяты с помощью розетки с шестью батометрами. Послойные промеры воды включают температуру ($T^{\circ}\text{C}$), соленость (S , ‰), растворенный кислород (O_2 , мг/л), степень насыщения воды кислородом (M , ‰), водородный показатель (pH), содержание сероводорода (H_2S , мг/л). Определение этих параметров сделаны выборочно, что было связано с различием в планах экспедиционных работ, проводимых параллельно ОНУ и УкрНЦЕМ в одном и том же рейсе.

Донные осадки отобраны дночерпателем ($0,1 \text{ m}^2$ van Veen) и гравитационной трубкой до 2 м длиной. На каждой станции взяты пробы донных отложений для определения УВГ, CO_2 , а также геохимических, литологических, минералогических и мейобентических характеристик донных отложений.

Из геохимических характеристик донных отложений по стандартным методикам измерены pH поровых вод, pH и E_h осадков, $S_{\text{общ}}$, $S_{\text{орг}}$, $S_{\text{карб}}$. Гра-

нулометрический (ситовой и отмучивание) и литологический анализы поверхностного (0–2 см) слоя осадков проведены по методике Н.В. Логвиненко и Э.И. Сергеевой [12]. По результатам гранулометрического анализа подсчитано процентное содержание каждой фракции в пробе и рассчитаны Md и So .

Минералогический анализ поверхностного (0–2 см) слоя осадков проведен для песчаной (0,5–0,25 мм) и алевритовой (0,25–0,1 мм) фракций. Каждая из них была взвешена и просмотрена под бинокулярным микроскопом для определения процентного содержания обнаруженных минералов. Так же определялось процентное содержание раковинного детрита. Полученные процентные содержания переводились в весовые значения.

Определение содержания УВГ (предельных и непредельных) и CO_2 проводили в пробах донных осадков, которые были герметически закупорены на судне и затем обработаны в лаборатории по запатентованной методике [1]. Дегазация проб осуществлялась в виброакустическом дегазаторе. Для этого проба в открытой банке помещалась в дегазатор, герметизировалась, подвергалась прогреву на водяной бане до температуры 75–80°C при включенном виброакустическом излучателе и под действием вакуума (разряжение 0,8–0,82 кгс/см) на протяжении одного часа, а затем исследована на хроматографе «Кристаллюкс-4000М» с использованием сертифицированных поверочных смесей

В результате анализа было определено содержание углекислого газа (CO_2), метана (CH_4) и его гомологов: предельных – этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (nC_4H_{10}), пентан (iC_5H_{12}), нео-пентан (нео C_5H_{12}), i-пентан (iC_5H_{12}), n-пентан (nC_5H_{12}) и непредельных: этилен (C_2H_4), ацетилен C_2H_2), пропилен (C_3H_6).

Количественный и таксономический состав мейобентоса определяли по разработанным ранее методикам [37, 51, 82, 87]. Пробы отбирали из верхнего ненарушенного слоя осадков посредством кольца диаметром 10 см и толщиной 2 см, фиксировали формалином, разбавленным морской водой в пропорции 3:1 с добавкой 20 г $Na_2B_4O_7$ на литр раствора, анализировали в микропалеонтологической лаборатории ОНУ имени И.И. Мечникова после окончания рейса. Там их промыли через сито с размером ячеек 63 μm , залили дистиллированной водой с добавлением красителя «Бенгальский розовый» и просмотрели во влажном состоянии в бинокулярном микроскопе. Живые (окрашенные) и мертвые фораминиферы подсчитывались вместе, поскольку, во-первых, живых фораминифер было мало, а во-вторых, общее число раковин лучше характеризует сезонную динамику популяций [46]. Если численность позволяла, под бинокулярным микроскопом вручную отобрали 300 раковин фораминифер и столько же остракод (для популяционной статистики), среди которых подсчитали частоту встречаемости (процентное содержание) каждого вида/подвида. Общая численность фораминифер и остракод пересчитали на 50 г сухого осадка для будущего сравнения численных характеристик современных и ископаемых форм в геологических целях. Таксономическую идентификацию фораминифер провели по работам [35, 37].

Для безраковинного мейобентоса пересчет на вес осадка не требовался, ибо в ископаемом состоянии он не сохраняется. Поэтому плотность его популяций характеризовали количеством экземпляров на m^2 . Для идентификации нематод животные извлекали из пробы, помещали в жидкость Зайнхорста (Seinhorst) (дистиллированная вода – 70 частей, этанол – 29 частей и глицерин – 1 часть) для их осветления. Затем выложили на предметное стекло с добавлением глицерин-желатина, и накрыли покровным стеклом [19, 82]. Препараты изучали с по-

мощью светового микроскопа “Konus 5625 Biorex3”. Идентификацию нематод провели в соответствии с трудами [19, 28, 69, 70, 84] и базы данных «NeMys» [47].

Количественные характеристики мейобентоса включают численность/плотность, количество видов и коэффициент разнообразия или Shannon-Wiener Index H' . Такой подход является стандартным для выяснения пространственного и вертикального распределения организмов [35, 85].

По солености фораминиферы разделены на: олигогалинные (1–5‰), стриктоэвригалинные (11–26‰), полигалинные (18–26‰) и голэвригалинные (1–26‰); по глубине: мелководные (0–30 м), относительно глубоководные (31–70 м) и глубоководные (71–220 м) [85, 89]. Для остракод и нематод столь дробная характеристика, к сожалению, не разработана. До настоящего времени живые (окрашенные) фораминиферы с твердой раковиной не встречались глубже изобаты 220 м, как считалось, из-за сероводородного заражения [85]. Настоящие исследования показали, что некоторые виды могут существовать и за пределами шельфа. Поэтому понятие «глубоководные» для Черного моря фораминиферы будет в будущем расширено.

Все обнаруженные виды фораминифер и остракод изучены и сфотографированы в электронном сканирующем микроскопе в университете Манитобы (Виннипег, Канада). Коллекция фораминифер и остракод хранится в Палеонтологическом музее Одесского национального университета имени И.И. Мечникова, а нематод в Институте морской биологии НАН Украины.

Корреляцию между абиотическими и биотическими параметрами провели в пакете Статистика 10 с целью интеграции полученных результатов, выведения общих закономерностей распространения УВГ и мейобентоса в донных отложениях.

Результаты

Физико-химические параметры водной толщи

За исключением солености (рис. 4 б), все другие параметры с глубиной уменьшаются. Резкий скачок температуры от 20°C до 8°C (рис. 4 а) имеет место на отметке –40 м (термоклин); глубже она остается постоянной. Соленость воды постепенно увеличивается с глубиной от 18,9‰ до 21,8‰ на отметке порядка –100 м и далее не меняется (рис. 4 б).

Содержание и насыщенность воды кислородом уменьшается от 8,6 мг/л (103,4%) в поверхностном слое воды до 0,46 мг/л (4,9%) на отметке –180 м (рис. 4 в). Резкое снижение (оксиклин?) происходит на –80 м. По другим данным оксиклин с крутым градиентом располагается в Черном море на отметке –120 м [77]. Такая разница в значениях говорит о нестабильном положении его границы, связанном, очевидно, с локальными условиями, сезонной изменчивостью и пр. По одной из классификаций [61], горизонты воды подразделяются на нормально кислородные [normoxic] (>2 мг/л), гипокислородные [hypoxic] (<2 мг/л), бескислородные [anoxic] (0 мг/л), и сульфидные [sulfide] (0 мг/л кислорода и присутствие свободного сульфида). В нашем материале верхняя толща 0–80 м относится к нормально кислородным водам. Ниже располагаются гипокислородные воды (во всяком случае до отметки –150 м), где появляется сероводород (0,38 мг/л),

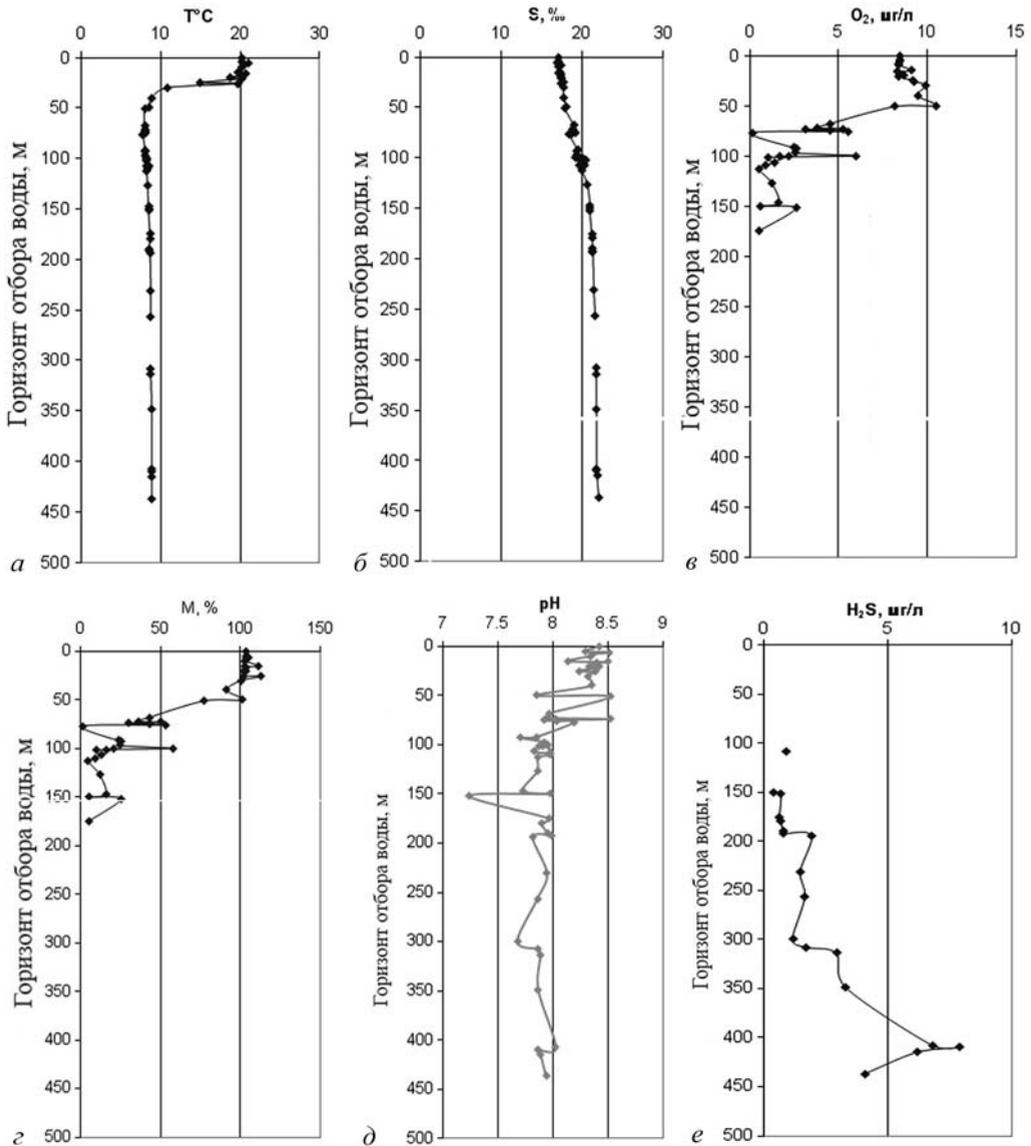


Рис. 4. Параметры водной толщи в диапазоне 0–500 м

содержание которого с глубиной скачкообразно возрастает, достигая максимума 7,92 мг/л на отметке –410 м (рис. 4 е). Глубже измерения отсутствуют, что, наряду с отсутствием измерений кислорода на глубине свыше –150 м, не позволяет классифицировать нижележащие слои воды, однако их приблизительную оценку дают характеристики донных осадков, что будет рассмотрено ниже.

Понижение рН (рис. 4 д), т.е. повышение кислотности водной толщи по мере продвижения ко дну связано с увеличением содержания сероводорода (рис. 4 е) и является результатом окислительно-восстановительных реакций на границе нормально кислородных и гипокислородных водных горизонтов, которые приводят к высвобождению ионов водорода, уменьшающих значения рН [8].

Гранулометрическая, литологическая и минералогическая характеристики донных отложений

Донные отложения представлены четырьмя основными гранулометрическими фракциями – гравийной, псаммитовой, алевритовой и пелитовой. Их распределение по обе стороны от ОДЗКР сходно, хотя пелит несколько преобладает к западу, а песок – к востоку от него (рис. 5 а).

Также сходны и средние значения S_o , а вот Md значительно выше к западу от ОДЗКР (рис. 5 б). Эту разницу создает станция №40 (глубина моря – 112 м), где $Md=9$ за счет обилия пустых (мертвых) раковин моллюсков. Если эту станцию исключить из расчетов, то значения Md на востоке и западе от ОДЗКР практически идентичны (рис. 5в). Забегая вперед, следует отметить, что донные отложения на этой станции имеют одно из наиболее высоких для исследованного региона содержание метана ($22,28 \cdot 10^{-2}$ об. %), что может свидетельствовать о повышенной смертности моллюсков в районе данной станции

Минералогический анализ показывает наличие на большинстве станций глауконита, гидротроилита, пирита, кварца, содержания которых по станциям варьируют в среднем Их средние содержания 0,76%, 0,014%, 0,18% и 0,15%, соответственно несколько выше к западу от ОДЗКР (за исключением кварца). В одной пробе (ст. 42, глубина моря – 234 м) обнаружен грейгит с содержанием 0,35 г/т. Здесь содержание метана ($10,28 \cdot 10^{-2}$ об.%) почти в десять раз превышает его среднее значение ($1,67 \cdot 10^{-2}$ об.%) к востоку от ОДЗКР. Оно также выше среднего значения ($8,4 \cdot 10^{-2}$ об.%) к западу от ОДЗКР.

Глауконит свидетельствует о нейтральных и слабовосстановительных условиях осадконакопления, связанных с формированием глинистых минералов в морском бассейне на значительной глубине. Гидротроилит говорит о начальной стадии сульфидного образования, пирит – о сформировавшихся восстановительных условиях и развитии сульфидной минерализации, возможно, благодаря выносам железа и серы флюидными потоками. Кварц, кристаллы которого в значитель-

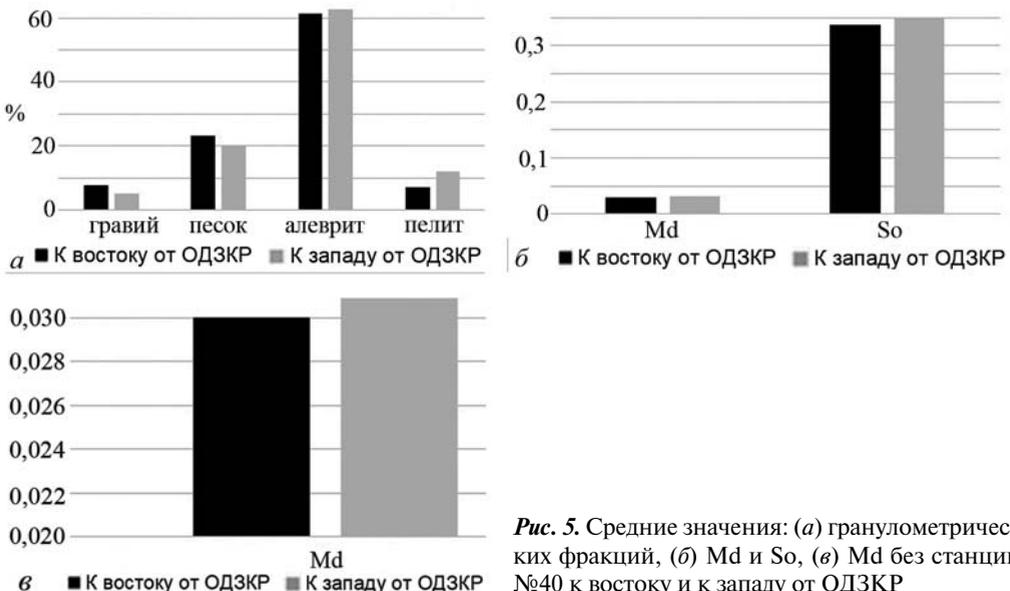


Рис. 5. Средние значения: (а) гранулометрических фракций, (б) Md и S_o , (в) Md без станции №40 к востоку и к западу от ОДЗКР

ной степени окатаны, свидетельствует о заметной роли терригенного материала в процессе осадконакопления. Грейгит показывает присутствие в процессах минералообразования эндогенной составляющей.

Геохимические параметры донных отложений

Распределение геохимических параметров в пробах донных отложений по обе стороны от ОДЗКР практически не отличается, несмотря на разницу в глубинах, на которых они были отобраны (рис. 6).

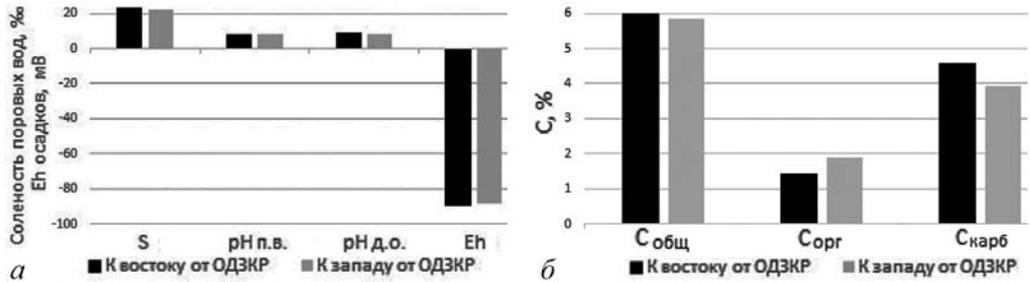


Рис. 6. Средние значения геохимических параметров донных осадков к востоку и западу от ОДЗКР: (а) соленость поровых вод, рН поровых вод, рН донных осадков, Eh донных осадков; (б) углерод

Обращают на себя внимание отрицательные значения Eh, которые варьируют от $-59,7$ мВ (ст. 32, глубина моря -334 м) до $-125,5$ мВ (ст. 42, глубина моря -234 м) независимо от расположения станций, глубины моря, гранулометрии осадков. Такие значения говорят о наличии восстановительной среды и хорошо согласуются с находками глауконита, гидротроилита, пирита, а также, забегая вперед, сульфидизации раковин органических матриц фораминифер (рис. 19).

Все изложенное позволяет говорить о сходстве условий среды донных биотопов по обе стороны от ОДЗКР.

Состав и концентрации УВГ и CO_2 в донных отложениях

Среднее содержание CO_2 и метана в донных отложениях намного выше к западу от ОДЗКР, чем от востоку от него (рис. 7, 8).

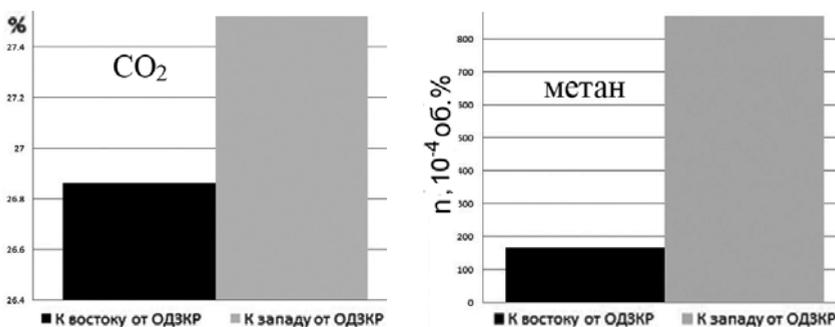


Рис. 7. Среднее содержание углекислого газа в донных осадках к востоку и западу от ОДЗКР

Рис. 8. Среднее содержание метана ($n \cdot 10^{-4}$) в донных осадках к востоку и западу от ОДЗКР

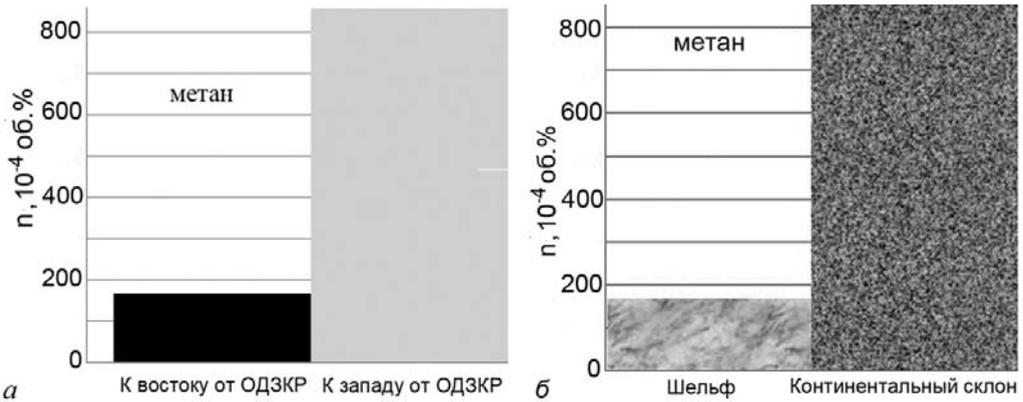


Рис. 9. Среднее содержание метана в донных отложениях станций расположенных (а) на шельфе к востоку и западу от ОДЗКР, (б) шельфе и континентальном склоне к западу от ОДЗКР

Аналогичная закономерность выдерживается как на шельфовых станциях, расположенных по обе стороны от ОДЗКР (рис. 9 а), так и на станциях, расположенных на шельфе и континентальном склоне к западу от ОДЗКР (рис. 9 б).

Таким образом, содержание метана в донных отложениях намного выше к западу, чем к востоку от ОДЗКР и не зависит от глубины моря.

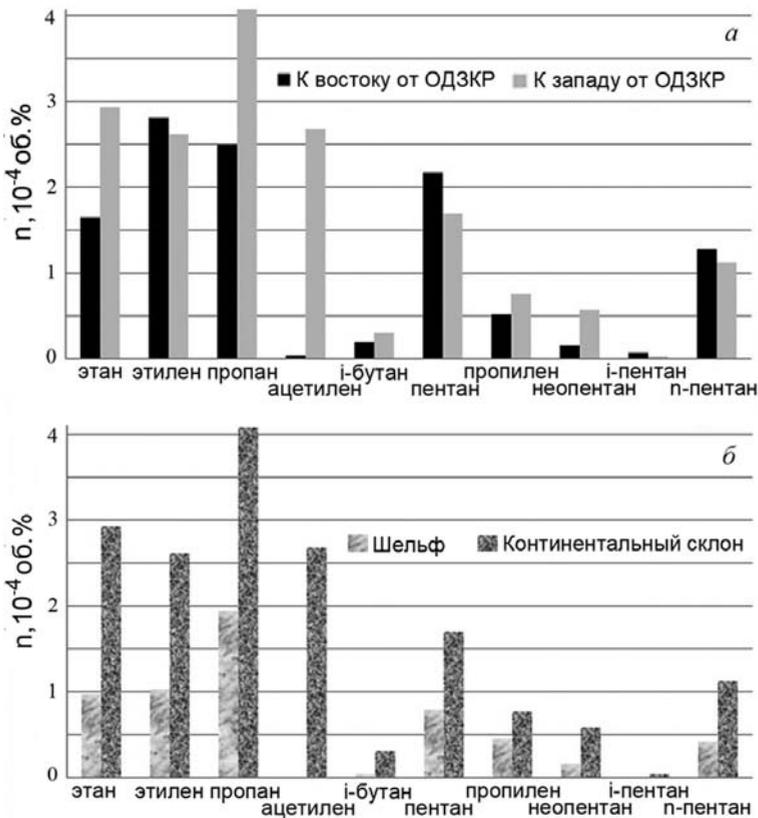


Рис. 10. Среднее содержание гомологов метана в донных осадках станций расположенных на шельфе к востоку и западу от ОДЗКР (а), шельфе и континентальном склоне к западу от ОДЗКР (б)

Содержание гомологов метана не превышает $4,5 \cdot 10^{-4}$ об. %, при этом содержание отдельных из них (этан, пропан, ацетилен, i-бутан, пропилен, неопентан) выше к западу от ОДЗКР (рис. 10 а). Что касается сравнения станций, расположенных на шельфе и континентальном склоне, то содержание всех без исключения измеренных гомологов метана выше в отложениях склона (рис. 10 б).

Наличие гомологов метана само по себе говорит в пользу ископаемого метана [11], а более высокое содержание всех без исключения УВГ к западу от ОДЗКР, как на шельфе, так и на континентальном склоне – в пользу их связи с «дымоходами».

Таким образом, разделение всей выборки абиотических параметров по территориальному принципу, основанному на тектоническом строении района, позволяет сформировать два массива данных, в которых изученные параметры донных отложений, а также водной толщи, весьма сходны, за исключением глубины моря и содержания УВГ, которые значительно выше к западу от ОДЗКР.

Количественный и качественный (таксономический) состав мейобентоса в донных отложениях

В исследуемом районе зафиксировано 10 групп мейобентоса: Foraminifera, Nematoda, Harpacticoida, Ostracoda, Halacaridae, Turbellaria, Oligochaeta, Polychaeta, Bivalvia и Gastropoda (рис. 11), среди которых окрашен-

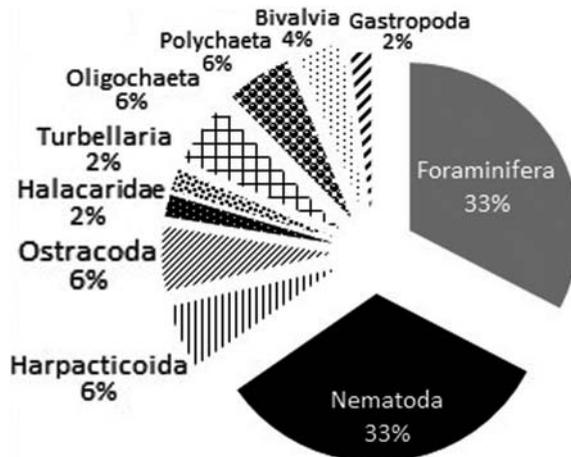


Рис. 9. Доля групп мейобентоса в его общей плотности

ные бенгальским розовым организмы присутствуют во всех группах, т. е. были живыми в момент отбора проб.

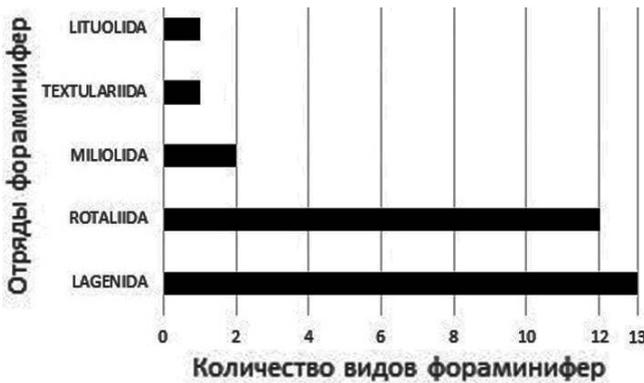
На долю фораминифер и нематод приходится по 33% от всего изученного мейобентоса (рис. 11). При этом, первые доминируют на востоке, а вторые на западе. Содержание остальных групп мейобентоса незначительно, причем на востоке отсутствуют Halacaridae, Oligochaeta, Polychaeta, а на западе Gastropoda и Turbellaria (рис. 12). Максимальная плотность всего мейобентоса составляет 33,000 экз/м². Его средняя плотность к востоку от ОДЗКР выше, чем к западу – 1566 и 950 экземпляров на м², соответственно (рис. 12).



Рис. 12. Средняя плотность поселений отдельных групп мейобентоса и всего мейобентоса к востоку и к западу от ОДЗКР

Фораминиферы

Всего обнаружено 29 видов бентосных фораминифер (один из которых в открытой номенклатуре) из 20 родов, 10 семейств и 5 отрядов (рис. 13).



Наиболее представителен по количеству видов отряд Lagenida, включающий 13 видов. Все они – полигалинные эндобентосные формы, которые, вследствие их образа жизни, хорошо приспособлены к дефициту кислорода [41].

Рис. 13. Число видов фораминифер в отрядах

Второй по представительности – отряд Rotaliida. Он включает 12 видов и подвигов, большинство из которых стриктоэвригалинные эпибентосные. Здесь также присутствует два голэвригалинных вида. В целом, среди фораминифер олиголинных видов нет, голэвригалинных – 2, стриктоэвригалинных – 7, полигалинных – 20 (табл. 2).

Обнаруженные фораминиферовые комплексы к востоку от ОДЗКР типичны для внешнего шельфа Черного моря [37, 89], в то время как преобладание лагенид в комплексах к западу от него достаточно необычно и, безусловно, показательно.

Наибольшая и наименьшая численность фораминифер обнаружена на станциях, расположенных к востоку (рис. 14 а) и западу (рис. 14 б) от ОДЗКР.

Средние значения численности (рис. 15 а) и видового разнообразия (рис. 15 б) фораминифер значительно выше к востоку чем к западу от ОДЗКР.

Даже, если исключить станции, расположенные на склоне и сравнить только станции, расположенные на шельфе, то распределение численности фора-

Таблица 2. Список бентосных фораминифер, обнаруженных в донных осадках, с данными по их экологии и образу жизни

Отряд	Вид	Экология	Образ жизни
LITUOLIDA Lankester, 1885	<i>Labrospira</i> sp.	Полигалинный	Эндобентос
TEXTULARIIDA Lankester, 1885	<i>Eggerelloides scaber</i> (Williamson), 1858	Полигалинный	Эпибентос
MILIOLIDA Delage and Hirouard, 1896	<i>Miliolinella selene</i> (Karrer), 1868	Полигалинный	Эпибентос
	<i>Pateoris dilatatus</i> (d'Orbigny), 1838	Полигалинный	Эндобентос
ROTALIIDA Delage & Hirouard, 1896	<i>A. tepida</i> (Cushman), 1928	Голэвригалинный	Эпибентос
	<i>Haynesina anglica</i> (Murray), 1965	Голэвригалинный	Эпибентос
	<i>Ammonia ammoniformis</i> (d'Orbigny), 1826	Стриктоэвригалинный	Эпибентос
	<i>Canalifera parkerae</i> Yanko, 1974	Стриктоэвригалинный	Эпибентос
	<i>Criboelphidium poeyanum</i> (d'Orbigny), 1839	Стриктоэвригалинный	Эпибентос
	<i>Criboelphidium translucens</i> (Natland), 1938	Стриктоэвригалинный	Эпибентос
	<i>Elphidium ponticum</i> Dolgopolskaja and Pauli, 1931	Стриктоэвригалинный	Эндобентос
	<i>Nonion matagordanus</i> Kornfeld, in Cushman, 1939	Стриктоэвригалинный	Эпибентос
	<i>Porosonion martkobi ponticum</i> Yanko, 1989	Стриктоэвригалинный	Эпибентос
	<i>A. compacta</i> Hofker, 1969	Полигалинный	Эпибентос
	<i>Bolivina variabilis</i> (Williamson), 1858	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Bulimina marginata</i> d'Orbigny, 1826	Полигалинный	Эндобентос
LAGENIDA Delage & Hirouard, 1896	<i>Entolingulina deplanata</i> Yanko, 1974	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Esosyrinx jatzkoi</i> Yanko, 1974	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Esosyrinx undulosus</i> (Terquem), 1878	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Fissurina fragilis</i> Troitskaya, 1987	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Fissurina lucida</i> (Williamson), 1858	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Fissurina solida</i> Seguenza, 1862	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Lagena vulgaris</i> Williamson, 1858	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Laryngosigma williamsoni</i> (Terquem), 1878	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Ortomorphina calomorpha</i> (Reuss), 1866	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Ortomorphina drammenensis</i> Feyling-Hanssen, 1964	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Ortomorphina filiformis</i> (d'Orbigny), 1826	Полигалинный	Эндобентос
	<i>Parafissurina dzemetinica</i> Yanko, 1974	Полигалинный	Эндобентос
	<i>P. lateralis</i> Cushman	Полигалинный	Эндобентос

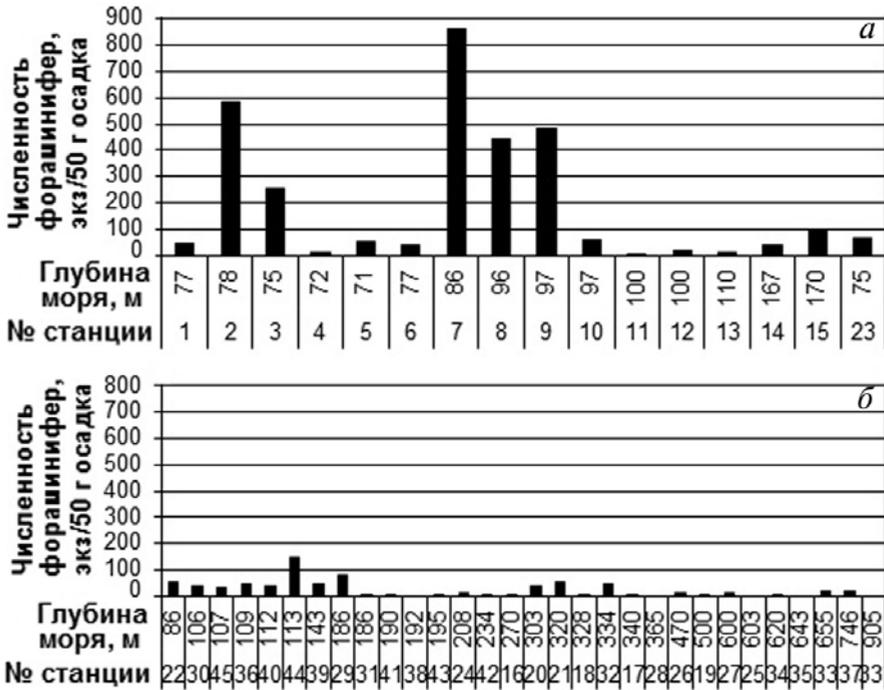


Рис. 14. Численность фораминифер по станциям: к востоку (а), к западу (б) от ОДЗКР

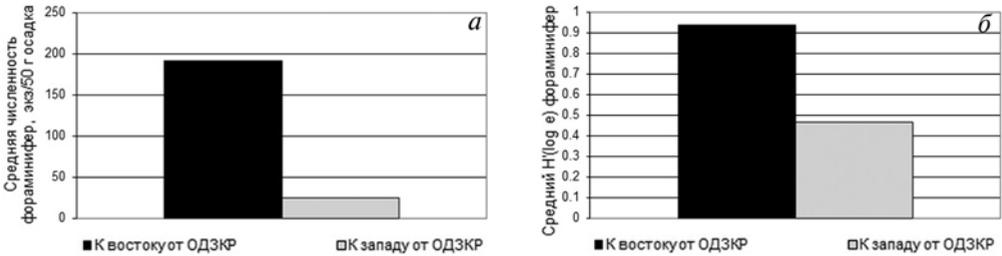


Рис. 15. Средние значения численности (а) и видового разнообразия фораминифер (б) к востоку и западу от ОДЗКР

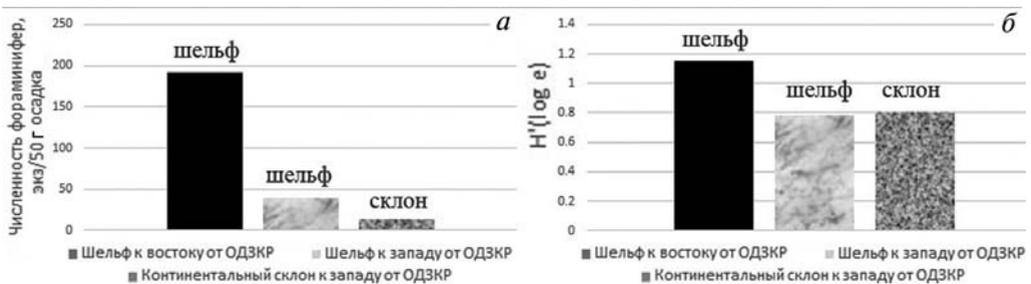


Рис. 16. Средние значения численности (а) и видового разнообразия фораминифер (б) на станциях, расположенных на шельфе к востоку и западу от ОДЗКР (а), на континентальном склоне к западу от ОДЗКР (б)

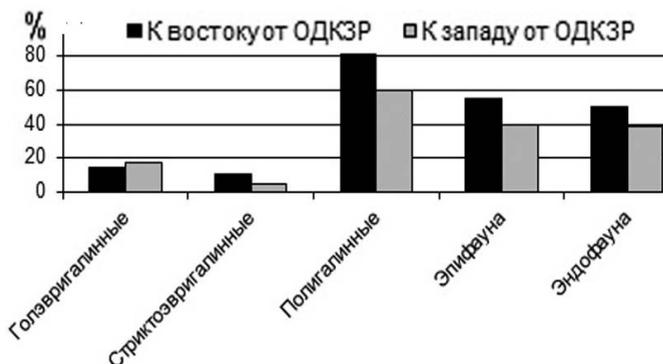


Рис. 17. Процентное содержание различных по экологии и образу жизни видов фораминифер к востоку и западу от ОДКЗР

миниер будет в четыре раза выше к востоку от ОДКЗР чем к западу от него (рис. 16), и это при том, что их видовое разнообразие на шельфе и континентальном склоне к западу от ОДКЗР практически не отличается, хотя на востоке оно чуть повыше (рис. 17).

Важно отметить, что среднее содержание Сорг, которое отражает наличие пищи для фораминифер по обе стороны (рис. 6б) практически не отличается даже на шельфовых станциях, где оно составляет 1.43% и 1.51% на востоке и западе от ОДКЗР, соответственно. А вот на станциях континентального склона, где $S_{орг}$ (=2,21%) значительно выше, численности фораминифер намного ниже, чем на шельфе. Это крайне необычно, поскольку в глубоких районах моря это единственный источник питания для фораминифер, обуславливающий их репродукцию [59].

По обе стороны от ОДКЗР среди фораминифер доминируют полигалинные виды, в то время как голэвригалинные виды с наиболее широким экологическим спектром преобладают к западу от ОДКЗР (см. рис. 17).

Это вполне естественно, поскольку такие виды легче приспосабливаются к изменчивым условиям среды, включая стрессы. К востоку от Одесского разлома в комплексах фораминифер по станциям доминирует эпибентосный полигалинный вид *Ammonia compacta*, в то время как к западу от него – эндобентосные полигалинные виды *Lagena vulgaris*, *Fissurina fragilis*, *Parafissurina lateralis* (рис. 18),

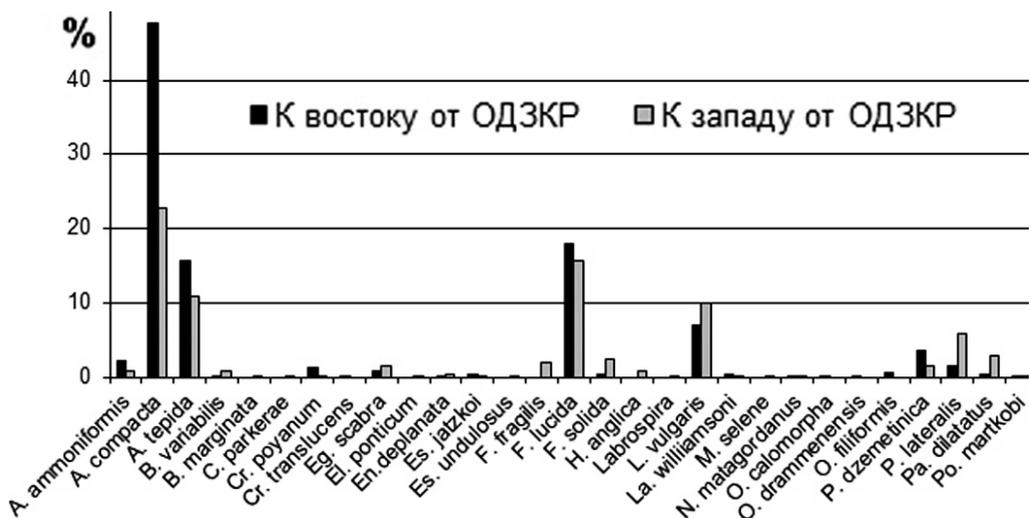
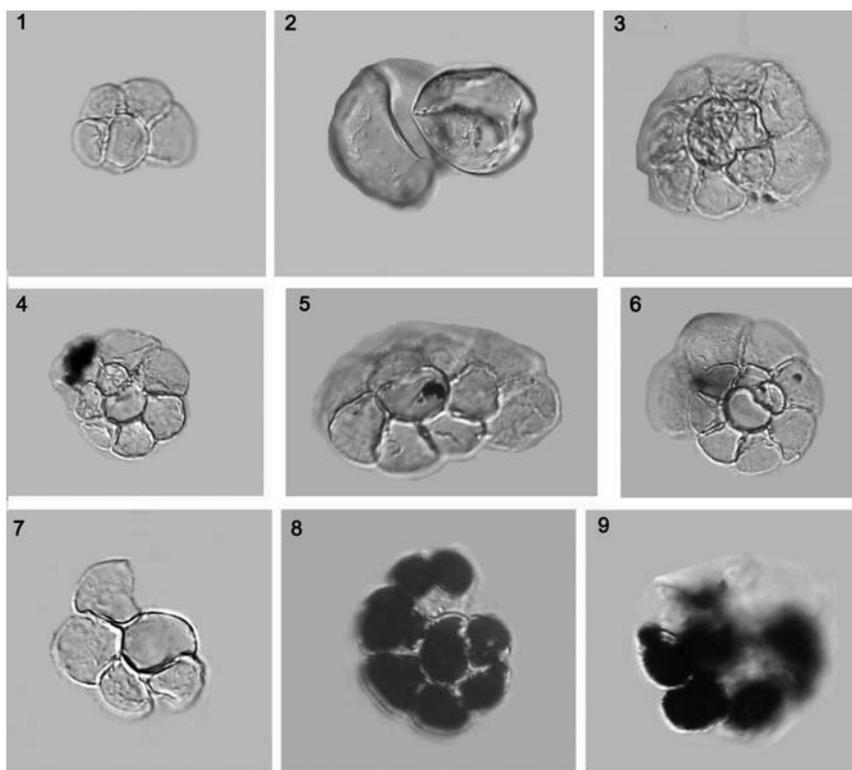


Рис. 18. Среднее процентное содержание видов в комплексах фораминифер к востоку и западу от ОДКЗР



HERMES surface samples 1,2 H-28a; 3, 5, 6 H-45B; 4 H-33a; 7-9 H-36a

Рис. 19. Зерна сульфидов, предположительно пирита (прослеживаются камеры черного цвета) в органических матрицах фораминифер *Ammonia compacta* со станций 28, 36, 45, расположенных к западу от ОДЗКР (фотография сделана в проходящем свете проф. Петрой Муди, Канада)

подтверждая еще раз разницу в условиях для жизни фораминифер по обе стороны от ОДЗКР и наличие более мощного стресса к западу от него.

В органических матрицах многих раковин фораминифер на станциях к западу от ОДЗКР содержатся зерна сульфидов, предположительно пирита (рис. 19), свидетельствующие в пользу восстановительных условий.

Нематоды

Нематоды представлены 44-мя свободноживущими бентосными видами (9 из них в открытой номенклатуре) из 26 родов, 17 семейств и 6 отрядов (рис. 20).

Большинство видов морские, некоторые из которых могут выдерживать солоноватоводные условия. Из них 16 видов приспособлены к дефициту кислорода вплоть до его полного отсутствия (табл. 3).

В отличие от фораминифер, средние значения плотности поселений (рис. 21 б) и видового разнообразия (рис. 21 а) нематод значительно выше к западу от ОДЗКР, чем к востоку от него.

К востоку от ОДЗКР встречено только шесть, к западу от него – 39 видов нематод (рис. 22).

Таблица 3. Виды нематод, известные по литературе из субкислородных и бескислородных зон Черного моря

Группа по отношению к кислороду	Вид	Образ жизни Глубина обитания	Источник
Нормоксик-гипоксик	<i>Chromadora nudicapitata</i> Bastian, 1865	Морской бентос, 80–140 м	Сергеева (1992)
	<i>Mohystera longicapitata</i> Filipjev, 1922 Морской бентос	Морской бентос, до 150 м	Сергеева (1992) Сергеева (2000)
	<i>Prochromadorella mediterranea</i> (Micoletzky, 1922)	Морской и солоноватоводный бентос, до 140 м	Сергеева (2000)
Нормоксик-гипоксик-аноксик	<i>Euchromadora striata</i> (Eberth, 1863)	Морской бентос	Сергеева (2000)
	<i>Metoncholaimus demani</i> (Zuz Strassen, 1894)	Морской бентос, 300–365 м	Сергеева, Колесникова (1996)
	<i>Paracanthonchus caecus</i> (Bastian, 1865)	Морской бентос, до 150 м	Сергеева (1992) Сергеева (2000)
	<i>Paralinhomoeus filiformis</i> (Filipjev, 1918)	Морской бентос, до 150 м	Сергеева (2000)
	<i>Quadricoma loricata</i> Filipjev, 1922	Морской бентос	
	<i>Terschellingia longicaudata</i> De Man, 1907	Морской бентос, до 200–250 м	Sergeeva, Gulin (2006) Сергеева, Колесникова(1996) Mureşan (2014)
	<i>Quadricoma steineri</i> Filipjev, 1922	Солоноватоводный бентос, до 150 м	
	<i>Sabatieria abyssalis</i> (Filipjev, 1918)	Морской, солоноватоводный бентос, до 200 м	Сергеева, Колесникова (1996) Сергеева (2000) Mureşan (2014)
	<i>Sabatieria longicaudata</i> Filipjev, 1922	Морской, солоноватоводный бентос, до 200 м	Сергеева, Колесникова 1996 Сергеева (2000)
	<i>Sabatieria pulchra</i> Filipjev, 1922	Морской, солоноватоводный бентос, до 200 м	Сергеева, Колесникова (1996) Сергеева (2000) Mureşan (2014)
	<i>Sphaerolaimus dispar</i> Filipjev, 1918	Морской, солоноватоводный бентос, до 350–500 м	Сергеева, Колесникова (1996) Сергеева (2000)
	<i>Sphaerolaimus ostreae</i> Filipjev, 1918	Морской, солоноватоводный бентос, до 200–350 м	Сергеева, Колесникова (1996)
<i>Terschellingia longicaudata</i> De Man, 1907	Морской бентос, до 200–250 м	Sergeeva, Gulin (2006) Сергеева, Колесникова (1996) Mureşan (2014)	

На востоке четыре вида нематод приспособлены к дефициту кислорода, а на западе таких видов в два раза больше (табл. 3, рис. 22). Наиболее высокая плотность нематод отмечена на ст. 40 (13,900 экз/м²), где содержание метана в донных

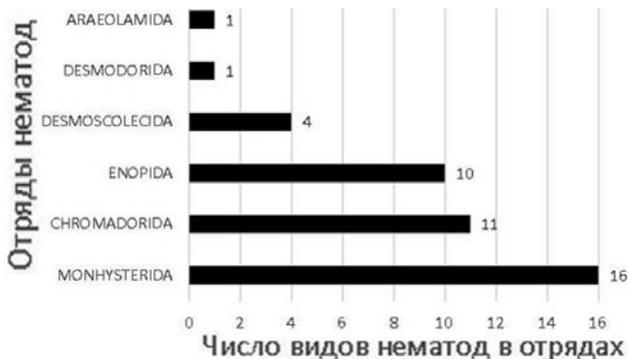


Рис. 20. Соотношение количества видов нематод в отрядах

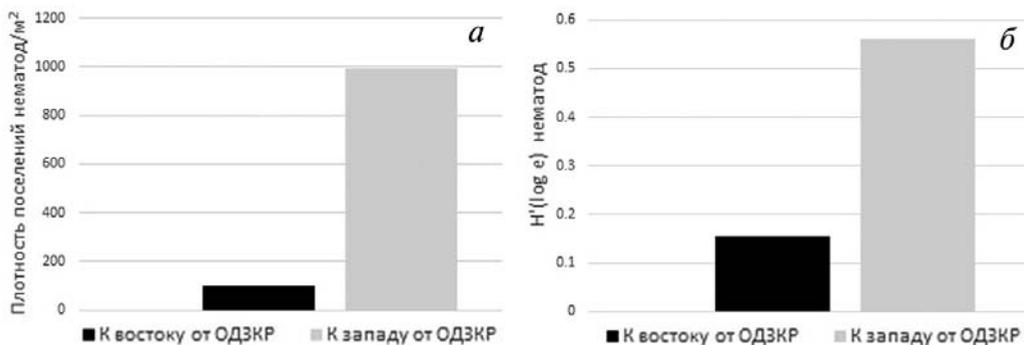


Рис. 21. Средние значения плотности поселений (а) и видового разнообразия (б), нематод к востоку и западу от ОДЗКР

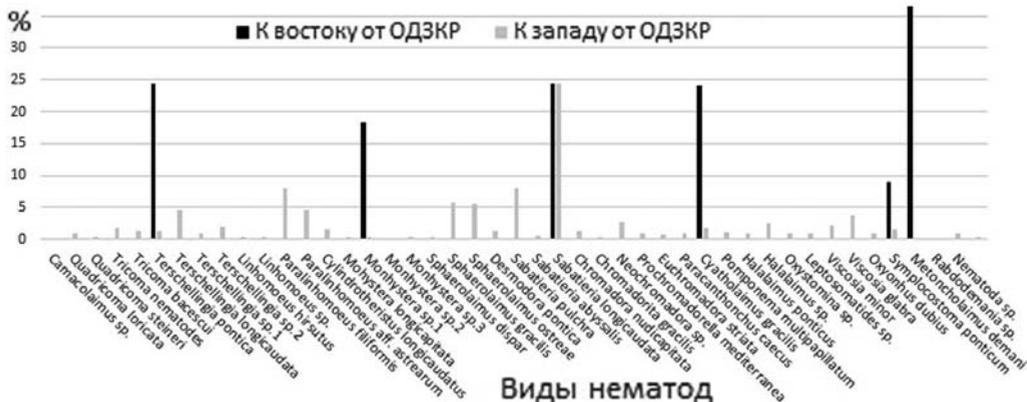


Рис. 22. Среднее процентное содержание видов нематод к востоку и западу от ОДЗКР

осадках достигает $22,28 \cdot 10^{-2}$ об.%. Здесь доминирует вид *Sabatieria abyssalis* (Filipjev, 1918), приспособленный к жизни в условиях гипоксии-аноксии (табл. 3, рис. 23).

В то же время количество фораминифер на этой станции очень низкое (40 экз/50 г осадка), так же, как и количество видов (5). Аналогичная картина наблюдается с численностями (37 экз/50 г осадка) и количеством видов (3) остракод.

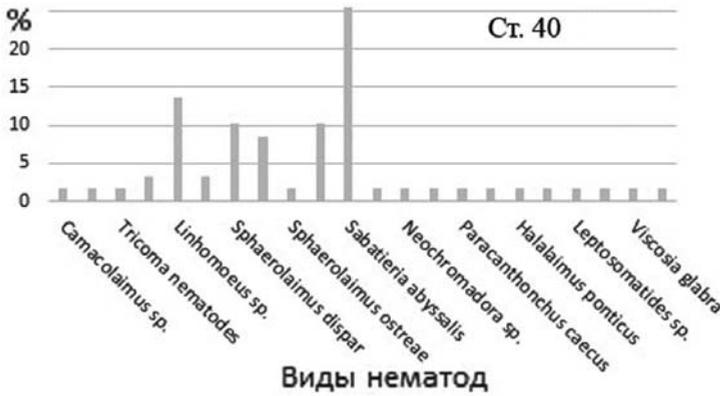


Рис. 23. Процентное содержание видов нематод в их комплексе на ст. 40, расположенной к западу от ОДЗКР

Остракоды

Всего обнаружено 11 видов преимущественно морских бентосных остракод (три из которых в открытой номенклатуре) из 8 родов. Их средняя численность (рис. 24 а) и видовое разнообразие (рис. 24 б) и значительно выше к востоку от ОДЗКР, чем к западу от него.

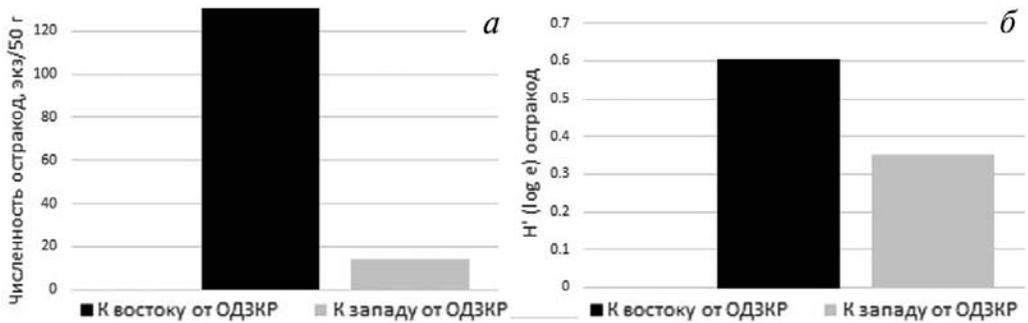


Рис. 24. Средние значения (а) численности и (б) видового разнообразия остракод к востоку и западу от ОДЗКР

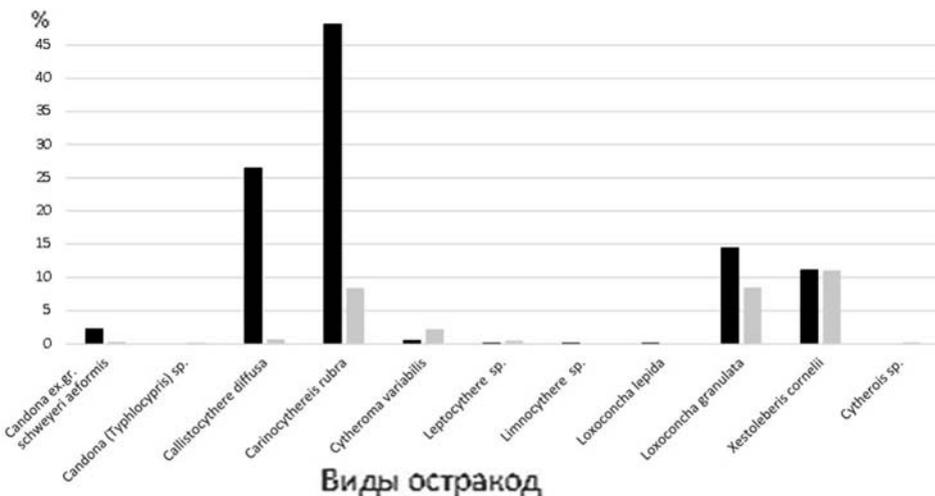


Рис. 25. процентное содержание видов остракод к востоку и западу от ОДЗКР

К востоку от ОДЗКР в составе остракодового комплекса доминирует *Carinocythereis rubra* (Mueller, 1894), а к западу от него – *Xestoleberis cornelii* Caraion, 1963 (рис. 25).

Эти виды остракод типичны для открытой части Черного моря, но могут выдерживать мезогалинные условия, поскольку являются эвригалинными [52].

Корреляции абиотических и биотических параметров

Анализ статистических распределений абиотических и биотических параметров показал, что большинство из них не отвечают нормальному закону распределения, или распределению Гаусса. С позиций статистики, корреляционно-регрессионный анализ таких выборок недопустим. Поэтому сначала все данные «привели» к одному и тому же закону распределения путем их “выравнивания”, а затем – к нормальному распределению путем перевода в десятичные логарифмы и последующей стандартизации. Корреляционные коэффициенты рассчитывали с учетом принятого географического районирования относительно ОДЗКР. Корреляция рассматривается как значимая, если $r > 0,37$ ($P < 0,05000$) при доверительном интервале 95%. Только такие коэффициенты учтены при сравнении и выделены жирным шрифтом в таблицах 4, 5.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между параметрами среды к востоку от ОДЗКР

	$C_{орг}$	$C_{карб}$	CO_2	Метан	Этилен	Аце-тилен	Про-пилен	Гравий	Псам-мит	Алев-рит	Пелит	Md	So
Глубина	-0,53	-0,03	-0,11	-0,13	0,06	0,11	0,15	0,37	0,44	-0,4	-0,86	0,33	-0,03
$C_{орг}$		-0,6	0,12	-0,14	-0,12	-0,21	-0,01	-0,6	-0,71	0,67	0,63	-0,72	0,38
$C_{карб}$			0,07	0,12	0,02	-0,11	-0,04	0,63	0,64	-0,61	-0,3	0,68	-0,5
CO_2				0,37	0,66	0,38	-0,27	0,21	0,27	-0,17	-0,01	-0,08	0,07
Метан					0,44	0,48	0,11	0,2	0,01	-0,11	-0,08	0,14	-0,08
Этилен						0,59	-0,03	0,06	0,13	-0,19	-0,11	0,15	-0,08
Ацетилен							0,35	-0,15	-0,12	0,21	-0,22	-0,15	0,27
Пропилен								-0,0	-0,24	0,19	-0,23	0,03	0,09
Гравий									0,79	-0,68	-0,47	0,62	-0,4
Псаммит										-0,87	-0,46	0,65	-0,56
Алеврит											0,49	-0,88	0,55
Пелит												-0,52	-0,04
Md													-0,45

* Вследствие незначительного содержания отдельных гомологов, корреляция проведена для основных их них (этилен, ацетилен, пропилен). Значимые коэффициенты выделены жирным шрифтом.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между параметрами среды к западу от ОДЗКР

	$C_{орг}$	$C_{карб}$	CO_2	Метан	Эти- лен	Ацети- лен	Пропи- лен	Гравий	Псам- мит	Алев- рит	Пелит	Md	So
Глубина	0,69	-0,04	0,23	0,15	0,06	0,29	-0,21	-0,35	-0,6	0,6	0,63	-0,2	0,24
$C_{орг}$		-0,15	0,03	0,06	-0,11	0,2	-0,17	-0,01	-0,57	0,39	0,37	0,11	0,22
$C_{карб}$			-0,02	0,15	0,12	0,03	0,24	0,11	0,51	-0,44	-0,26	0,03	-0,04
CO_2				0,57	0,59	0,44	-0,48	-0,28	-0,37	0,39	0,39	-0,16	0,29
Метан					0,19	0,2	-0,36	0,11	-0,12	-0,01	0,12	0,24	0,22
Этилен						0,37	-0,1	-0,39	-0,19	0,36	0,23	-0,26	0,25
Ацетилен							-0,18	-0,08	-0,34	0,23	0,37	0,03	0,28
Пропилен								0,16	0,36	-0,35	-0,22	0,08	-0,22
Гравий									0,28	-0,77	-0,58	0,9	-0,24
Псаммит										-0,81	-0,8	0,08	-0,2
Алеврит											0,72	-0,58	0,33
Пелит												-0,32	0,03
Md													0,08

* Вследствие незначительного содержания отдельных гомологов, корреляция проведена для основных их них (этилен, ацетилен, пропилен). Значимые коэффициенты выделены жирным шрифтом.

Хотя значения абиотических (за исключением глубины моря, содержаний метана и его гомологов) параметров к востоку и западу от ОДЗКР сходны (рис. 5–8), их корреляция между собой существенно различается.

К востоку от ОДЗКР глубина моря отрицательно коррелируется с содержанием $C_{орг}$ и пелитовой фракции, а к западу от него – наоборот, положительно. Также здесь наблюдается отрицательная корреляция между глубиной и содержанием псаммитовой, а положительная – с содержанием алевритовой фракции. Это говорит о том, что на востоке пространственное распространение осадков не подчиняется закону их нормального распределения, при котором размерность осадочного материала с глубиной уменьшается [79], а на западе, наоборот, подпадает под этот закон. Такое распределение может быть связано с разными источниками осадочного материала и процессами его переработки. На востоке существенный компонент донных отложений составляют обломки и целые раковины моллюсков. Отсюда и корреляционный тренд повышения гравийной ($r=0,37$) и псаммитовой ($r = 0,44$) фракций с глубиной. На западе раковинный материал значительно тоньше, чем на востоке, присутствуя, в основном, в псаммитовой фракции, с которой положительно коррелируется $C_{карб}$ ($r = 0,51$). В алевритовой фракции его, по-видимому, нет ($r = -0,44$).

Разница в распределении Скарб по обе стороны от ОДЗКР свидетельствует о более благоприятных условиях для жизни организмов с кальцитовыми раковинами на востоке, чем на западе. Это подтверждают и значительно более высокие здесь численности фораминифер и остракод (рис. 14, 15, 25, 26), что может быть связано с различием в обстановках осадконакопления. На востоке — это внешняя часть шельфа, где условия жизни для мейобентоса предпочтительнее в следствие достаточного количества кислорода, во всяком случае до глубины 130 м. На запа-

де – помимо внешней части шельфа, обстановки осадконакопления включают также бровку шельфа и континентальный склон, где процессы перемещения осадков и перетирания раковин более интенсивны чем на шельфе, и где среда меняется от нормально кислородной до гипокислородной во всяком случае.

Среднее содержание $C_{\text{орг}}$ в в донных отложениях с обеих сторон от ОДЗКР не превышает его среднего значения (2,15%) для всего Черного моря [3]. По мнению Т.И. Горшковой, главной причиной накопления органического вещества являются восстановительные условия толщи воды ниже 200 м, которые способствуют медленному распаду отмершего планктона. При слабой аэрации придонного слоя большое количество органического вещества усиливает дефицит кислорода в силу потребления на его окисление. Отрицательная корреляция $C_{\text{орг}}$ с глубиной ($r = -0,53$) на востоке и положительная ($r = 0,69$) на западе от ОДЗКР может свидетельствовать об активизации распада диатомовых водорослей, которых на востоке нет, в то время как на западе они обильны, демонстрируя высокий коэффициент корреляции ($r = 0,99$) с глубиной. Кроме того, содержание $C_{\text{орг}}$ напрямую зависит от механического состава осадков [3] и в нашем случае повсеместно положительно коррелируется с тонкими фракциями (алеврит и пелит). Такой характер взаимосвязи считается “классическим” для всех типов морских донных отложений и, в частности, для всего Черного моря [14]. При этом содержание $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{карб}}$ подчиняется обратной зависимости. Как и в других районах Азово-Черноморского бассейна [16] содержание $C_{\text{карб}}$ увеличивается с ростом доли крупноразмерных фракций – гравийной и псаммитовой

Корреляция абиотических и биотических параметров показывает негативный ответ биоты на увеличение глубины и УВГ и, во избежание повторения, будет рассмотрена более подробно в разделе Обсуждение.

Обсуждение

Три главные проблемы подлежат обсуждению: (1) происхождение УВГ в донных отложениях изучаемого района и их связь с тектоникой, (2) воздействие УВГ на количественное и качественное (таксономическое) распределение мейобентосных организмов на морском дне и сравнение такого воздействия в других бассейнах, (3) перспективы использования распределения мейобентоса для оконтуривания скоплений УВГ под морским дном.

Проблема №1

Как было сказано выше, на ископаемое происхождение метана указывает наличие в газовых выделениях гомологов метана (рис. 10), которые могут образовываться только в условиях высоких температур и давлений [11]. При бактериальном происхождении метана образование его гомологов не происходит [25]. Образование ацетилена возможно при дегидрировании двух молекул метана при температуре свыше 1400°C , что соответствует теоретической глубине более 45 км, что значительно глубже фундамента Днепровско-Донецкого грабена [9] и тем более района континентального склона Черного моря. Перестройка кристаллической структуры сульфидов железа по подобию грейгита характерна для гидротермальных процессов. Это значит, что грейгит в нашем материале является продуктом извержения грязевого вулкана, корни которого, как и других грязевых вулканов, уходят в домезозойский фундамент [32].

В литературе в пользу ископаемого метана свидетельствует локализация большинства газовых факелов в зонах внешнего шельфа и материкового склона, где трассируется циркумчерноморский разлом и фиксируются региональные или глубинные разломы. Об ископаемом метане свидетельствует и локализация газовых месторождений (Голицынское, Южноголицынское, Штормовое, Крымское, Архангельское) на северо-западе в узлах пересечения Одесского разлома с разломами северо-восточного простирания. В нашем материале повышенные концентрации УВГ фиксируются к западу от ОДЗКР, т. е. накладываются на зону разрывных нарушений и струйных выходов метана, указанных В.Н. Егоровым и др. [6]. Содержание УВГ в донных отложениях не проявляет корреляции с каким-либо параметром донных отложений, в частности с литологией, что находится в полном согласии с известными по литературе [27] данными. Однако, большинство УВГ позитивно коррелирует друг с другом, а на западе еще и с CO_2 , предполагая их совместное происхождение. CO_2 , в свою очередь, положительно коррелирует с тонкими фракциями – алевритом и пелитом, а те преобладают на станциях континентального склона и наружного шельфа, опять-таки к западу от ОДЗКР, разбитого разломами. Все это говорит в пользу ископаемого, или глубинного метана.

Проблема №2

По сравнению с другими районами Черного моря, изученные группы мейобентоса отличаются низкой численностью и количеством видов. Так, из 101 вида бентосных фораминифер, известных в Черном море [35, 89], здесь встречено только 29. Их наиболее высокая численность (859 экз/50 г) обнаружена только на одной станции № 7, на остальных она значительно ниже. В то же самое время в других районах Черного моря, свободных от выходов УВГ, она достигает десятков тысяч экз/50 г осадка [35]. При этом комплексы фораминифер особенно обеднены к западу от ОДЗКР, в том числе и на шельфовых станциях, не говоря уже о континентальном склоне, где численность особенно низкая. Это говорит о сильных стрессовых условиях для жизни фораминифер, а также остракод, поскольку ситуация с их численными и таксономическими характеристиками аналогична.

На первый взгляд, стресс может быть вызван глубиной бассейна. Однако, глубина сама по себе не является контролирующим фактором для батиметрической последовательности и численных характеристик бентосных фораминифер, несмотря на высокие отрицательные коэффициенты корреляции ($r = -0,8$) между глубиной и фораминиферами. Другие факторы, связанные с глубиной моря, эту последовательность определяют [56]. К таким факторам обычно относят соленость [74, 89, 91], кислород [57], пищевые ресурсы в виде $\text{C}_{\text{орг}}$ [50, 83, 91], субстрат [39], pH донных осадков [73] и прочие. Однако, как показали наши исследования, эти параметры весьма сходны по обе стороны от ОДЗКР и указывают на то, что другой фактор или факторы могут отвечать за стресс. Таким фактором вполне может быть метан, с которым отрицательно коррелирует численность фораминифер ($r = -0,85$) и остракод ($r = -0,96$), а также видовое разнообразие последних ($r = -0,65$). Значит, метан, по аналогии с рыбами (позвоночными!), может негативно воздействовать на метаболические и репродуктивные функции беспозвоночных фораминифер и остракод. Механизм такого влияния нуждается в экспериментальных исследованиях.

Весьма любопытна обратная зависимость между численными характеристиками фораминифер и содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$ в донных отложениях. В бассейнах с нор-

мальной океанической соленостью и кислородным режимом (например, в Средиземном море) поток Сорг является основным поставщиком питательных веществ для фораминифер на больших глубинах [59]. Именно он обеспечивает их высокую репродуктивность и батиметрическую последовательность на морском дне [40, 60]. В нашем случае этого нет. Все происходит с точностью наоборот. Увеличивается содержание $C_{орг}$ уменьшается количество фораминифер. Значит, либо источник питания другой, либо воздействие ископаемого метана и его гомологов настолько сильно, что перебивает потребности фораминифер к пище. Может быть тому виной дефицит кислорода и восстановительные условия? На первый взгляд, наличие сульфидов (предположительно пирита) в органических матрицах фораминифер может служить в поддержку такого предположения, как это имеет место в других районах Черного моря [10]. Однако, пиритизация фораминифер – частое явление и в донной среде, обогащенной кислородом, например, в Хайфском заливе, Израиль [86, 87, 88]. Ее возможная причина – стресс, который позволяет бактериям атаковать цитоплазму фораминифер, создавая восстановительную среду в частях организмов, атакованных бактериями [38]. Таким образом, пиритизация раковин фораминифер скорее всего говорит о нарушении защитных механизмов фораминифер [42, 43, 44] из-за отравления, например, тяжелыми металлами, как это имеет место в Хайфском заливе [87], или УВГ, как это имеет место в данном случае.

Если не $C_{орг}$, то какой другой источник питания могут использовать фораминиферы для поддержания их жизненных функций в районах повышенных концентраций УВГ? Некоторые исследователи, изучавшие фораминифер метановых сипов в морях с нормальной океанической соленостью и кислородным режимом, считают, что таким источником служат микробные маты, формирующиеся вокруг метановых сипов, на которых репродукция фораминифер резко возрастает [72]. Однако, согласно мнению других ученых, условия для жизни зообентоса на них отнюдь не постоянны и связаны с определёнными пороговыми уровнями кислорода и сероводорода [4]. Следует отметить, что все указанные авторы говорят о биогенном метане, в то время как воздействие ископаемого метана при наличии гомологов может быть иным. Этот вопрос требует отдельного изучения, предпочтительно в условиях эксперимента.

Доминирование в комплексах (в том числе и за пределами шельфа) эндобентосных фораминифер из отряда Lagenida, которые в настоящем материале были найдены в качестве обитателей восстановительных биотопов, опровергают нашу прежнюю точку зрения [35, 89] об отсутствии аэробной жизни в Черном море за пределами шельфа и согласуются с точкой зрения других исследователей [76, 77].

Подобно фораминиферам и остракодам, нематоды также отличаются обедненным видовым составом. В исследованном районе идентифицировано только 44 из 143 видов, известных в Черном море по литературным данным [78]. Значительная часть идентифицированных видов принадлежит к тиобиотическому типу [53, 54, 55, 82] из семейств Comesomatidae and Linhomoidae. Для них характерно длинное, тонкое тело и маленькая или совсем не выраженная ротовая полость без вооружения, свидетельствующая о питании очень мелкими частицами осадка или бактериями [65].

Увеличение плотности популяций, численности и видового разнообразия нематод к западу от ОДЗКР наряду с уменьшением этих показателей у фораминифер и остракод говорит о том, что повышенные содержание УВГ не являются

помехой, хотя и не благоприятствуют, их существованию. Об этом также говорит и отсутствие корреляции. Они способны занимать экологические ниши, непригодные для жизни другого мейобентоса. Создается впечатление, что к западу от ОДЗКР формируется особая фауна нематод, характерная для зон моря с метановой разгрузкой. При этом некоторые из обнаруженных видов нематод можно рассматривать как индикационные. К ним относятся *Desmodora pontica*, *Linhomoeus* sp, *Sabatieria abyssalis*, *Pomponema aff. multipapillatum*, *Terschellingia pontica*. Полученные результаты находятся в согласии с данными других исследователей, которые считают, что нематоды могут быть единственными многоклеточными животными в метановых биотопах, для которых будет характерно пониженное видовое разнообразие и доминирование отдельно взятых таксонов по сравнению с окружающей кислородной зоной [45]. Отдельные авторы [76, 77] отмечают, что некоторые виды нематод в районах метановых сипов имеют существенные аномалии в развитии жизненно важных органов, сходные с таковыми у нематод из районов с высокой техногенной нагрузкой. Причины таких аномалий в обоих случаях не совсем ясны, но связь с токсичностью донных осадков не вызывает сомнений [21]. В нашем материале подобные аномалии не наблюдались, но их поиск продолжается.

В совокупности все полученные по мейобентосу данные свидетельствует в пользу неблагоприятных для жизни фораминифер и остракод условий в местах разгрузки УВГ. Они также обнадеживающе свидетельствуют, что среди, по крайней мере, фораминифер могут быть найдены виды-индикаторы из числа эндобентосных форм из отряда *Lagenida*. Что касается нематод, то такие виды-индикаторы найдены и могут быть использованы для прослеживания мест УВГ разгрузки на морском дне.

Проблема №3

Ископаемое (глубинное) происхождение УВГ в изученном районе представляется наиболее вероятным и может свидетельствовать о территориальной приуроченности газовыделений к углеводородным месторождениям. Поэтому перспектива использования особенностей количественного и качественного (таксономического) распределения мейобентосных организмов для оконтуривания скоплений УВГ в донных осадках выглядит обнадеживающей. Мейобентосная съемка, будучи во всяком случае на первых порах сопряженной с геофизическими работами, газовой и геохимической съемкой донных отложений, позволит разработать основные критерии для оконтуривания скоплений УВГ под морским дном. Впоследствии это позволит удешевить стоимость поисковых работ и повысить их надежность.

Заключение

1. Физико-химические параметры водной толщи с акцентом на придонную воду, гранулометрические и геохимические параметры донных отложений сходны по всему району исследований и не влияют на распределение мейобентоса.

2. Состав УВГ (наличие метана и его гомологов) подтверждает их ископаемый (глубинный) генезис.

3. Снижение численных и таксономических показателей среди фораминифер и остракод, наряду с их увеличением среди нематод, а также выделение среди

них видов-индикаторов УВГ разгрузки на морском дне позволяет установить пространственное распределение мейобентоса в донных отложениях. В свою очередь, это способствует оконтуриванию скоплений УВГ и, в первую очередь, метана, в донных отложениях. Видами-индикаторами метановых выходов на дне Черного моря среди нематод могут служить *Terschellingia pontica*, *Linhomoeus sp.*, *Sabatieria abyssalis*, *Desmodora pontica*, *Pomponema aff. multipapillatum*. Среди фораминифер виды-индикаторы пока не выявлены. Однако, доминирование в комплексах представителей отряда Lagenida, которые, по-видимому, толерантны к УВГ, можно считать индикативным признаком областей метановых выходов на дне Черного моря.

4. Сравнение распределения изученного мейобентоса в районах с повышенными концентрациями УВГ в донных осадках Черного моря и других бассейнов, за некоторыми исключениями, говорит о сходстве полученных результатов.

5. Влияние разных концентраций УВГ на донные экосистемы существенно отличается и гораздо сложнее, чем прежде предполагалось. На сегодняшний день создается впечатление, что их выбросы в морскую среду особенно неблагоприятны для донных экосистем Черного моря, которые создают впечатление хрупких и уязвимых.

6. Полученные результаты являются абсолютно новыми для науки и требуют дальнейшего осмысления. Вполне возможно, что качественные и количественные характеристики фораминифер и нематод на дне Черного моря могут оказаться поисковыми признаками скоплений УВГ под морским дном. Они также позволяют оценить влияние УВГ на морскую биоту – вопрос, который в настоящее время открыт и сведения по нему крайне обрывочны и противоречивы. Настоящую работу следует считать пилотной. Ее развитие требует финансирования, в том числе с вовлечением экспериментальных работ в лабораторных условиях.

Благодарность

Авторы благодарят штат судна «Владимир Паршин» за помощь в получении фактического материала; доктора г.-м.н. профессора Е.Г. Коникова (ОНУ имени И.И.Мечникова, Одесса) за предоставление результатов гранулометрического анализа; академика НАНУ Е.Ф. Шнюкова (директора Отделения морской геологии и осадочного рудообразования НАНУ, Киев) за постоянное обсуждение результатов наших исследований и критические замечания, которые помогли улучшить манускрипт; доктора наук Равиндер Сидху за предоставленную возможность изучения фораминифер в электронном сканирующем микроскопе в университете Манитобы в Канаде; д.б.н. профессора Н.С. Сергееву (Институт морских биологических исследований, Севастополь) за помощь при обсуждении экологических характеристик нематод.

Работа является составной частью и выполнена при финансовой поддержке европейского проекта EU-FP6 HERMES «Hotspot Ecosystems Research on the Margins of European Seas» (2006–2010 г.г.) и госбюджетной темы Министерства образования и науки Украины «Изучить процессы формирования и пространственного распределения метана в Черном море и теоретически обосновать его влияние на эко- и геосистемы бассейна» (2014–2017 г.г.). Она также является вкладом в международный проект UNESCO-IGU-IGCP 610 «From the Caspian to Mediterranean: Environmental Change and Human Response during the Quaternary» (2013–2017 г.г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багрій І.Д., Кізлат А.М. Портативний пробовідбірник-дегазатор. *Деклараційний патент на корисну модель* виданий 15.07.2004. Бюл. № 7.
2. Гобаренко В.С., Муровская А. В., Егорова Т.П., Шеремет Е.Е. Современные коллизионные процессы на северной окраине Черного моря. *Геотектоника*. 2016. № 4. С. 68–87
3. Горшкова Т.И. Биогеохимия современных морских осадков и их биологическое значение. *Труды ВНИРО*. 1974. 98, вып. I, часть 2. С. 135–144.
4. Гулин С.Б., Тимофеев В.А., Бондаренко Л. В. Зообентос в микробиотопах метановых сипов шельфовой зоны Крымского побережья. *Системы контроля окружающей среды*. 2010. Вып. 14. С. 225–229.
5. Дикань Н.І. Систематика четвертинных остракод України (довідник-визначник). Київ. 2006. 429 с.
6. Егоров В. Н., Поликарпов Г. Г., Гулин С. Б., Артемов Ю. Г., Стокозов Н. А., Костова С. К. Современные представления о средообразующей и экологической роли струйных метановых газыделений со дна Черного моря. *Морской экологический журнал*. 2003. 2. № 3. С.5–26.
7. Ермаков А.П. Глубинное строение черноморской впадины по результатам новой интерпретации сейсмических данных. Дис. канд. геол.-мин. Наук. 2005. Москва. 182 с.
8. Коновалов С. К., Рябинин А. И. Водородный показатель (рН) вод Черного моря. *Метеорология и гидрология*. 1987. №10. С. 75–81.
9. Кононов Н.Ф., Островский С.А., Устинюк Л.Ф. Новая технология некоторых синтезов на основе ацетилена. М.: Недра. 1977. 171 с.
10. Кравчук А.О., Кравчук О.П. Аутигенные сульфиды в раковинах фораминифер // *Всеукр. наук. конф. Від геології до біосферології. Проблеми сьогодення, майбутні перспективи*, Київ. 2007. С.80–81
11. Леин А.Ю., Иванов М.В. Крупнейший на Земле метановый водоем. *Природа*. 2005. №2. С. 19–26.
12. Логвиненко Н.В., Сергеева Э.И. Методы определения осадочных пород: Учебн. пособие для вузов. Л.: Недра. 1986. 240 с.
13. Люшвин П. В. Индикация зон дегазации в акваториях. URL: http://oilgasjournal.ru/vol_3/lushvin.pdf.
14. Митропольский А.Ю., Безбородов А.А., Овсяный Е.И. Геохимия Черного моря. Київ.: Наукова думка. 1982.-143 с.
15. Никишин А. М., Коротаев М. В., Болотов С. Н., Ершов А. В. Тектоническая история черноморского бассейна . *Бюл. моск. о-ва испытателей природы. отд. геол.* 2001. 76 (3 б). С. 3–18.
16. Овсяный Е. И., Коновалов С.К., Митропольский, А.Ю., Котельянец Е.А. Органический углерод и карбонатность современных донных отложений Керченского пролива . *Геохимия*. 2015. № 12. С. 1120–1131.
17. Пасынков А.А. Основные принципы методики поисковых геохимических исследований на газоперспективных участках Черного моря. *Збірн. наук. праць УкрДГРІ*. 2006. № 3. С. 54–72.
18. Платонова Т.А. Низшие Eporlida (свободноживущие морские нематоды) морей СССР. Нематоды и их роль в мейобентосе. Л.: Наука. 1976. С. 54–55.
19. Платонова Т.А. Класс круглые черви – Nematoda Rudolphi, 1808. *Определитель фауны Черного и Азовского морей*. I. Киев: Наук.думка. 1968. С. 111–183.
20. Сергеева Н. Г., Колесникова Е. А. Результаты изучения мейобентоса Черного моря. *Экология моря*. 1996. Вып. 45. С. 54–62.
21. Сергеева Н.Г. Зональное распределение мейобентоса и его важнейшего компонента-свободноживущих нематод в Черном море. *Дис. на соиск. ст. докт. биол. наук*. Севастополь, ИнБЮМ НАНУ. 1996. 259 с.
22. Сергеева Н.Г. Мейобентос глубинной сероводородной зоны Черного моря *Гидробиологический журнал*. 2001. 37. № 3. С. 3–9
23. Сергеева Н.Г. Мейобентос Черного моря в районе сипинговых источников. 2001. URL: <http://www.eco-mir.net/show/518>.
24. Сергеева Н.Г. Характеристика фауны свободноживущих нематод Ялтинского залива в периоды функционирования мелководного и глубоководного выпусков хозяйственно-быто-

- вых вод/ *Многолетние изменения зообентоса Черного мор.* отв. ред. Заика В.Е. Киев: Наук. думка. 1992. С. 170–184.
25. Совга Е.Е., Любарцева С.П. Источники, стоки и перенос метана в Черном море. *Экол. безпека прибереж. та шельф. зон та комплекс. використ. ресурсів шельфу.* 2006. Вип. 14. С. 530–545.
 26. Созанський В. І. Відновлення світових запасів нафти і газу як стратегічна проблема сучасності. *Геол. журн.* 2013. № 2. С. 68–74.
 27. Ткаченко Г.Г., Деркач Ю.І., Ейфа М.М., Соколовська Г.М. Газоподібні вуглеводні донних відкладів західної частини підняття Голціна та ознаки їх епігенетичності (Чорне море). *Геологія узбережжя і дна Чорного та Азовського морів у межах УРСР.* 1974. № 7. С. 106–108.
 28. Филиппьев И.Н. Свободноживущие морские нематоды окрестностей Севастополя. *Труды Особой зоологической лаборатории и Севастопольской биологической станции Российской АН.* Сер. 2. 1918 1921. № 4. Вып. 1, 2. 614 с.
 29. Шнюков Е. Ф., Старостенко, В. И., Русаков, О. М., Кутас Р. И. Глубинная природа газовых факелов западной части Черного моря по результатам геофизических исследований. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана.* 2005. № 5. С. 70–82.
 30. Шнюков Е.Ф., Клещенко С.А., Артемов Ю.Г. Новое поле газовых факелов на западе Черного моря. *Геофиз. журн.* 2003. 25. № 2. С. 153–161.
 31. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А. Газовый вулканизм Черного моря. Киев: Логос. 2013. 383 с.
 32. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е. Я. Корни черноморских грязевых вулканов // *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана.* 2013. № 1. С. 87–92.
 33. Шнюков Е.Ф., Пасынков А.А., Клещенко С.А. и др. Газовые факелы на дне Черного моря. Киев: ОМГОР НАНУ, ПП «ГНОЗИС». 1999. 133 с.
 34. Шнюков Е.Ф., Янко В.В. Газоотдача дна Черного моря: геолого-поисковое, экологическое и навигационное значение. *Вестник Одесского университета, Серия географических и геологических наук.* 2014. 19. Вып. 3. № 23. С. 225–241.
 35. Янко В.В. Четвертичные фораминиферы Понто-Каспия: классификация, экология, био-стратиграфия, история развития. *Дис. докт. геол.-мин. наук.* М. 1989. 1000 с.
 36. Янко В.В., Кулакова И.И., Кравчук А.О. Дегазация дна Черного моря и мейобентос как средство ее прослеживания (по результатам международного проекта HERMES). *Материалы научно-практической конференции «Метан в морских экосистемах».* Изд. Юж. федер. унив. 2014 г. С.134–137.
 37. Янко В.В., Троицкая Т. С. Позднечетвертичные фораминиферы Черного моря. 1987. М.: Наука. 111 с.
 38. Alve E. Benthic foraminifera reflecting heavy pollution in Sorfjord, Western Norway. *Journal Foraminiferal Research.* 1991. № 21. P. 1–19.
 39. Basso D., Spezzaferri S. Distribution of living (stained) benthic foraminifera in the Iskenderun Bay (Eastern Turkey): A statistical approach. *Bollettino Societa Paleontologica Italiana.* 2000. 39, № 3. P. 359–379.
 40. Bernhard J.M. Benthic foraminiferal distribution and biomass related to pore-water oxygen content. *Deep-Sea Research.* 1992. 39. P. 585–605.
 41. Bernhard J.M. Microaerophilic and facultative anaerobic benthic foraminifera: A review of experimental and ultrastructural evidence. *Rev. Paleobiol.* 1996. 15. P. 261–275.
 42. Bresler V., Yanko V. Chemical ecology: A new approach to study living benthic epiphytic foraminifera. *Journal of Foraminiferal Research.* 1995 a. 25 (3). P. 267–279.
 43. Bresler V., Yanko V. Acute toxicity of heavy metals for benthic epiphytic foraminifera *Pararotalia spinigera* (Le Calvez) and influence of seaweed-derived DOC. *Env. Toxicology and Chemistry.* 1995 b. № 14. P. 1687–1695.
 44. Bresler V., Yanko-Hombach V. Chemical Ecology of Foraminifera: Parameters of Health, Environmental Pathology and Assessment of Environmental Quality. *Environmental Micropalaeontology.* 2000. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Plenum Publishers. P. 217–256.
 45. Dando P.R., Jensen P., O'Hara S.C.M., Niven S.J., Schmaljohann R., Schuster U., Taylor L.J. The effects of methane seepage at an intertidal/shallow subtidal site on the shore of the Kattegat, Vendsyssel, Denmark. *Bulletin of the Geographical Society of Denmark.* 1994. 41. P. 65–79.

46. Debenay J. P., Tsakiridis E., Soulard R., Gressel H. Factors determining the distribution of foraminiferal assemblages in Port Joinville Harbor (Ile d'Yeu, France): the influence of pollution. *Marine Micropaleontology*. 2001. **43** (1–2). P. 75–118.
47. Deprez T. et al. 2007. NeMys. URL: <http://www.nemys.ugent.be>.
48. Dinu, C., Wong, H. K., Юambrea, D., Matenco, L. Stratigraphic and structural characteristics of the Romanian Black Sea shelf. *Tectonophysics*. 2005. **410** (1–4). P. 417–435.
49. Finetti I., Bricchi G., Del Ben A., Pipan M., Xuan Z. Geophysical study of the Black Sea. *Boll. Geofis. Teor. Appl.* 1988. № 30(117–118). P. 197–324.
50. Fontanier C., Jorissen F.J., Licari L., Alexandre A., Anschutz P., Carbonel P. Live benthic foraminiferal faunas from the Bay of Biscay: faunal density, composition, and microhabitats. *Deep-Sea Research*. 2002. **49**, №. 4. P. 751–785.
51. Hulings N.C., Gray J.S. A Manual to the Study of Meiofauna. *Smith. Contrib. Zool.* 1971. **78**. 84 p.
52. Ivanova E., Schornikov E., Marret F. et al. Environmental changes on the inner northeastern Black Sea shelf, off the town of Gelendzhik, over the last 140 years. *Quaternary International*. 2014. P. 338–348.
53. Jensen P. Meiofaunal abundance and vertical zonation in a sublittoral soft bottom, with a test of the haps corer. *Marine Biology*. 1983. **74**, №. 3. P. 120–125.
54. Jensen P. Nematode fauna in the sulphide-rich brine seep and adjacent bottoms of the East Flower Garden, NW Gulf of Mexico. IY. Ecological aspects. *Marine Biology*. 1986. **92**. P. 489–503.
55. Jensen P. Species, distribution and a microhabitat theory for marine mud dwelling Comesomatidae (Nematoda) in European waters. *Cahiers de Biologie Marine*. 1981. **22**. P. 231–241.
56. Jorissen F.J., Barmawidjaja D.M., Puskaric S., van der Zwaan G.J. Vertical distribution of benthic Foraminifera in the northern Adriatic Sea: The relation with high organic flux. *Marine Micropaleontology*. -1992. **19**. P. 131–146.
57. Kaiho K. Effect of organic carbon flux and dissolved oxygen on the benthic foraminiferal oxygen index (BFOI). *Marine Micropalaeontology*. 1999. **37**. P. 67–76.
58. Kumar Ajoy Bhaumik, Gupta Anil. Deep-sea benthic foraminifera from gas hydrate-rich zone, Blake Ridge, Northwest Atlantic (ODP Hole 997A). *Current Science*. 2005. **88**, № 12. P. 1969–1973.
59. Loubere P., Fariduddin M. Benthic Foraminifera and the flux of organic carbon to the seabed / Sen Gupta, B. (ed.), Modern Foraminifera. 1999. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. P. 181–199.
60. Luth U., Luth C. Benthic meiofauna and macrofauna of a methane seep area south-west of the Crimean Peninsula, Black Sea. *MEGASEEBS-Methane Gas Seeps Exploration in the Black Sea* (U. Luth, C. Luth, H. Thiel, eds). Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung. 1998. № 14. P. 113–126.
61. Middelburg J.J., Levin L.A. Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. *Biogeosciences*. 2009. **6**. №. 7. P. 1273–1293.
62. Munteanu I., Matenco L., Dinu C., Cloetingh S. Kinematics of backarc inversion of the Western Black Sea Basin. *Tectonics*. **30**. P. 1–21.
63. Murecan M. Diversity and distribution of free-living nematodes within periazotic level on the Romanian shelf of the Black Sea. *Geo-Eco-Marina*. 2014. №20. P. 19–28.
64. Nikishin A.M., Ziegler P.A., Bolotov S.H., Fokin P.A. Late Palaeozoic to Cenozoic Evolution of the Black Sea–Southern Eastern Europe Region: A View from the Russian Platform. *Turkish Journal of Earth Sciences*. 2011. № 20. C. 571–634.
65. Ott J.A., Novak R. Living at an interface; meiofauna at the oxygen/sulphide boundary of marine sediments. *Reproduction, Genetics and Distribution of Marine Organisms. 23rd European Marine Biological Symposium*. J.S. Ryland, P.A. Tyler (eds). Denmark: Olsen, Fredensborg. 1989. P. 415–422.
66. Ott J.A., Rieger G., Enderes F. New mouth less interstitial worms from the sulphide system: symbiosis with prokaryotes, P.S.Z.N.I. *Marine Ecology*. 1982. **3**. P. 313–333.
67. Panieri G. Benthic foraminifera response to methane release in an Adriatic Sea pockmark. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*. 2003. **109**. № 3. P. 549–562.
68. Patin S. A. Assessment of anthropogenic impact on marine ecosystems and biological resources in the process of oil and gas field development in the shelf area. *Water Resources*. 2004. № 31(4). P. 413–422.
69. Platt H.M., Warwick R.M. Free-living marine nematodes. Part I. British Enoplids. *Synopsis of the British Fauna* №. 28. Cambridge: The Linnaean Society of London and The Estuarine and Brackish-water Sciences Association. 1983. 307 p.

70. Platt H.M., Warwick R.M. Free-living marine nematodes. Part II. British Chromadorids. *Synopsis of the British Fauna (New Series)* №. 38. Leiden: The Linnaean Society of London and The Estuarine and Brackish-water Sciences Association. 1988. 502 p.
71. Polikarpov G. G., Tereschenko N. N., Gulin M. B. Chemoecological study of the bivalve *Modiolus phaseolinus* in habitats near the oxic/anoxic interface near methane gas seeps in the Black Sea. *Methane Gas Seeps Exploration in the Black Sea*. U. Luth, C. Luth, H. Thiel (eds). Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung. 1998. № 14. P. 92–100.
72. Rathburn A.E., Levin L.A., Held Z., Lohmann K.C. Benthic foraminifera associated with cold methane seeps on the northern California margin: Ecology and stable isotopic composition. *Marine Micropaleontology*. 2000. № 38. P. 247–266.
73. Saraswat R., Kouthanker M., Kurtarkar S., Nigam R., Linshy V. N. Effect of salinity induced pH changes on benthic foraminifera: a laboratory culture experiment. *Biogeosciences Discuss*. 2011. № 8. P. 8423–8450.
74. Sen Gupta B. K. Foraminifera in marginal marine environments. *Modern Foraminifera*. Sen Gupta, B.K. (ed.). 1999. Dordrech: Kluwer Academic Publishers. P. 141–160.
75. Sen Gupta B.K., Platon E., Bernhard J.M., Aharon P. Foraminiferal colonization of hydrocarbon-seep bacterial mats and underlying sediment, Gulf of Mexico slope. *Journal of Foraminiferal Research*. 1997. №27. P. 292–300.
76. Sergeeva N. G., Gulin M. B. Meiobenthos of methane seepage areas in the upper anoxic zone of the Black Sea (underwater Dnieper canyon). *Extended Abstracts of the Second Plenary Meeting and Field Trip of IGC-521 Project "Black Sea - Mediterranean corridor during the last 30 ky: Sea level change and human adaptation"*. 20-28 August 2006, I.I.Mechnikov National University, Odessa, Ukraine. V. Yanko-Hombach, A. Gilbert, R. Martin (ed.). Odessa: Astroprint. 2006. P. 152–153.
77. Sergeeva N. G., Mazlumyan S.A., Lichtschlag A., Holtappels M. Benthic Protozoa and Metazoa living in deep anoxic and hydrogen sulfide conditions of the Black Sea: Direct observations of actively moving Ciliophora and Nematoda. *International Journal of Marine Science*. 2014. 4, №.49. P. 1–11.
78. Sergeeva N., Zaika V. The Black Sea meiobenthos in permanently hypoxic habitat. *Acta Zoologica Bulgarica*. 2013. 65. № 3. P. 139–150.
79. Swift D.J.P., Thorne J.A. Sedimentation on continental margins, I: A general model for shelf sedimentation. *Special Publication Number 14 of the International Association of Sedimentologists*. Swift, D.J.P. et al. (eds), Shelf Sand and Sandstone Bodies: Geometry, Facies and Sequence Stratigraphy. Oxford: Blackwell Scientific. 1991. P. 3–31.
80. Tari E., Sahin M., Barka A., Reilinger R., King R.Q., McClusky S., Prilepin M. Active tectonics of the Black Sea with GPS. *Earth Planets Space*. 2000. № 52. C. 747–751.
81. Tari G., Davies J., Dellmour R., Larratt E., Novotny B., Kozhuharov E. Play types and hydrocarbon potential of the deep water Black Sea, NE Bulgaria. *Lead. Edge*. 2009. № 28(9). P. 1076–1081,
82. Vincx M. Meiofauna in marine and freshwater sediments. *Methods for the examination of organismal diversity in soils and sediments*. In: Hall G.S. (ed.). Cambridge: University Press. 1996. P. 187–195.
83. Wahyudi, Masao Minagawa. Response of benthic foraminifera to organic carbon accumulation rates in the Okinawa Trough. *Journal of Oceanography*. 1997. 53. P. 411–420.
84. Warwick R.M., Platt H.M., Somerfield P.J. Free-living marine nematodes. Part III. Monhysterids. Shrewsbury: *The Linnean Society of London and The Estuarine and Coastal Sciences Association*. 1998. 296 p.
85. Yanko V. Stratigraphy and palaeogeography of marine Pleistocene and Holocene deposits of the southern seas of the USSR. *Mem.Soc. Geol. Ital*. 1990. 44. P. 167–187.
86. Yanko V., Kronfeld A., Flexe A. The response of benthic foraminifera to various pollution sources: Implications for pollution monitoring. *Journal of Foraminiferal Research*. 1994. 24 (1). P. 1–17.
87. Yanko V., Ahmad M., Kaminski M. Morphological deformities of benthic foraminiferal tests in response to pollution by heavy metals: implications for pollution monitoring. *Journal of Foraminiferal Research*. 1998. № 28 (3). P. 177–200.
88. Yanko V., Arnold A., Parker W. The effect of marine pollution on benthic foraminifera. *Modern Foraminifera*. Ed.: Sen Gupta, B.K. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. – P. 217–238.
89. Yanko-Hombach V. Controversy over Noah's Flood in the Black Sea: geological and foraminiferal evidence from the shelf. *The Black Sea Flood Question: Changes in Coastline, Climate and Human Settlement*. Yanko-Hombach V., Gilbert A.S., Panin N., Dolukhanov P.M., eds. 2007. Dordrecht: Springer. P. 149–203.

90. Yanko-Hombach V., Shnyukov E., Konikov E. et al. Response of biota to methane emissions in the Black Sea: Preliminary results from complex geological, geochemical, palaeontological, and biological study. *Extended Abstracts of the Fifth Plenary Meeting and Field Trip of IGCP-521- INQUA 0501*. August 22-31, 2009. Gilbert A., Yanko-Hombach (eds). Izmir: DEU Publishing House. 2009. P. 181–184.
91. Yanko-Hombach V., Kondariuk T., Motnenko I. Benthic foraminifera indicate environmental stress from river discharge to marine ecosystems: example from the Black Sea. *Journal Foraminiferal Research*. 2017. V. 47. No. 1. P. 70–92.

Статья поступила 26.01.2017

В.В. Янко, С.В. Кадурін, О.О. Кравчук, І.І. Кулакова

МЕЙОБЕНТОС ЯК ПОШУКОВА ОЗНАКА СКУПЧЕНЬ ГАЗОПОДІБНИХ ВУГЛЕВОДНІВ В ДОННИХ ВІДКЛАДАХ ЧОРНОГО МОРЯ

На підставі сполученого аналізу абіотичних (фізико-хімічні параметри водної товщі, геохімічні, литологічні, мінералогічні властивості донних відкладень) і біотичних (кількісний і таксономічний склад форамініфер, нематод, остракод) параметрів зроблено висновок про можливість використання мейобентоса як пошукової ознаки скопчень вуглеводневих газів і, в першу чергу, метану в донних відкладеннях північно-західній частині Чорного моря.

Ключові слова: мейобентос, донні відклади, Чорне море, екосистема, форамініфери.

Janko V.V., Kadurin S.V., Kravchuk O.O., Kulakova I.I.

MEIOBENTHOS AS AN INDICATOR OF GASEOUS HYDROCARBON RESERVOIRS IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE BLACK SEA

This study examines the relationship between the distribution of meiobenthos and concentrations of hydrocarbon gases, primarily methane, in the sediments of the northwestern part of the Black Sea. Based on the dual analysis of abiotic characteristics (physical and chemical parameters of the water column, geochemical, lithological, mineralogical properties of the sediment) and biotic ones (quantitative and taxonomic composition of foraminifers, nematodes, and ostracods), the possibility of using meiobenthos as an indicator of gaseous hydrocarbons stored under the seabed is evaluated.

Key words: *Meiobenthos, bottom sediments, the Black Sea, ecosystem, foraminifera.*