

УДК 57.088.5(262.5)

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ И АБСОЛЮТНЫХ МАСС ДОННЫХ ОСАДКОВ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2021 г. Н. Н. Терещенко¹, *, А. В. Пархоменко¹, **

¹Федеральный исследовательский центр “Институт биологии южных морей
им. А.О. Ковалевского РАН”, Севастополь, Россия

*e-mail: ntereshchenko@yandex.ru

**e-mail: parkhomenko.al@yandex.ua

Поступила в редакцию 23.05.2020 г.

После доработки 05.06.2020 г.

Принята к публикации 18.03.2021 г.

Статья посвящена изучению особенностей осадконакопления на северо-западном шельфе и в глубоководной области западной части Черного моря на основе анализа собственных и литературных данных, полученных методом радиоизотопной геохронологии донных отложений. Установлено, что взаимосвязь между абсолютными массами донных осадков и первичной продукцией носила линейный характер, обусловленный комплексом биогеографических, гидрологических и гидрохимических условий. Особенности формирования донных осадков в открытой части моря связаны с наличием сероводорода (H_2S) в глубинных водах (глубже 100–200 м). Показано, что из кислородсодержащего слоя в H_2S -зону моря поступает на континентальном склоне – 20, а в глубоководной области – 17 г/(м² год) органического осадочного вещества. При этом преобладающую долю в осадках составляло минерализованное биогенное осадочное вещество: 54 и 68.5% соответственно. Оценен вклад органического, минерализованного биогенного и литогенного осадочного вещества в формирование абсолютных масс донных осадков и показано изменение их соотношения с расстоянием от берега. По характеру формирования абсолютных масс донных осадков выделено 3 группы акваторий моря, в которых отношение биогенной и литогенной составляющих в абсолютных массах отражают изменение роли этих составляющих в формировании донных осадков.

Ключевые слова: Черное море, донные осадки, абсолютные массы, скорости седиментации, первичная продукция

DOI: 10.31857/S0030157421040146

ВВЕДЕНИЕ

Седиментационные процессы в морских экосистемах, преобразование взвешенного осадочного вещества и его состава в водной толще играют важную роль, как в продукционных процессах, так и в самоочищении морских вод и обеспечении качества водной среды водоемов, которые все в той или иной мере подвержены антропогенному влиянию [13, 15, 16, 28, 34]. Это связано с большой значимостью этих процессов в формировании направленности и интенсивности биогеохимического круговорота вещества и энергии в морских экосистемах [5, 22–24].

Особенность Черного моря состоит в том, что водная толща моря разделена на две относительно изолированные зоны: кислородсодержащую и сероводородную [30]. В верхнем кислородсодержащем слое (0–100, 200 м) протекает основная часть продукционно-деструкционных процессов

оксифионтов. Проведенными ранее исследованиями перераспределения техногенных веществ в Черном море установлено, что для сорбционно активных консервативных веществ основным потоком их элиминации из воды служат процессы седиментации [7, 13, 15, 16, 31, 32] с рассеянным осадочным веществом из водной толщи в донные осадки. Эти процессы можно охарактеризовать скоростью осадконакопления и абсолютными массами донных осадков (АМДО) [22, 25]. Очевидно, что на вариабельность АМДО значительное влияние может оказывать количество автохтонного (продуцируемого в экосистеме водоема) и аллохтонного (привносимого в водную экосистему) осадочного вещества. В целом, источником осадочного вещества в Черном море, как и в других морских и океанических акваториях, является взвешенное терригенное вещество, образовавшееся при стоке рек, из-за процессов абразии берегов и дна, эолового переноса, а также

взвешенное органическое и минерализованное вещество, основу которого составляет первичная продукция [20, 22, 27]. Ранее показано, что в глубоководной области Черного моря осадочное вещество, как в водной толще, так и в донных отложениях преимущественно состоит из автотонного биогенного вещества, образовавшегося за счет продукции фитопланктона [9, 11]. Поэтому исследование роли первичной продукции (ПП), в сравнении с другими источниками осадочного вещества, очень важно для понимания процессов осадконакопления в разных районах Черного моря.

Исследования по оценке скорости осадконакопления в западной части Черного моря (ЗЧМ) проводились на станциях в районах прибрежного шельфа, континентального склона и в глубоководной части моря с использованием радиотрассеров методом радиоизотопной геохронологии осадков [7, 21, 29, 38, 49]. Однако в этих исследованиях связь АМДО с уровнем ПП и концентрацией органического вещества в осадочном материале и его минерализованной части не рассматривалась.

Поэтому цель работы состояла в выявлении особенностей осадконакопления на шельфе северо-западной части и в глубоководной области ЗЧМ, отличающихся по уровню ПП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Районы и материалы исследования. Изучению осадкообразования и вертикальным потокам осадочного вещества в Черном море посвящено много работ, краткий обзор которых представлен в работах [7, 17]. В настоящей работе анализируются собственные и литературные данные по определению скорости осадконакопления с использованием радиоизотопных трассеров [28]: природного (^{210}Pb) и техногенных (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu) радиоизотопов и их сочетаний [7, 9, 21, 29, 32, 43, 47, 49] без учета турбидных зон в этих акваториях [21, 49]. В наших исследованиях отбор проб донных отложений осуществлялся в ЗЧМ на станциях 11 (2007 г.) и 12, 28 (2013 г.) (рис. 1). На рис. 1 также приведены станции отбора проб в период с 1988 по 2003 г., данные по которым были взяты из литературных источников.

Глубина на станциях исследования, год отбора проб, данные определения АМДО и источник данных представлены в табл. 1. При обобщении данных по АМДО районирование ЗЧМ принимали идентичным предложенному в работе по обобщению данных по ПП (рис. 1) [10]. Из этих районов были рассмотрены некоторые: Д, СЗ₁, СЗ₂, ЗС, ЗГ (рис. 1), где проводилось от 3 до 9 определений скорости осадконакопления на район исследования (табл. 1), а также были получены

оценки роли биогенного и литогенного осадочного вещества в изменении скорости осадконакопления [9]. Для этих районов ЗЧМ были использованы обобщенные данные по ПП с оценкой среднемноголетней годовой ее величины за несколько десятилетий (период 1973–1997 г.) [10]. Более поздними исследованиями межгодовой изменчивости температуры, хлорофилла “а” и ПП в открытой части Черного моря, ограниченной изобатой 200 м, за период с 1978 по 2008 гг. было установлено, что в изменчивости этих показателей не выявлено достоверных трендов. В целом, полученные результаты указывают на стационарность процессов, происходящих в этот период в открытой части Черного моря [18]. Так, среднемноголетняя годовая величина ПП в открытой части моря за период (1978–2008 гг.) составляла 136 гС/(м² год) [18], что практически совпадает с годовым значением ПП, равным 140 гС/(м² год), полученным за период 1978–1992 гг. [3], и 135 гС/(м² год) – за период с 1998 по 2007 г. [33]. Поэтому допустимо принять среднемноголетние годовые величины ПП, полученные для исследуемых районов Черного моря за период 1973–1997 гг. [10], в качестве средних величин ПП для оценок скоростей осадконакопления на масштабе нескольких десятилетий, которые включают период от начала 60-х гг. XX века до 2013 г.

Методы исследования. В открытой части моря пробы донных осадков отбирали мультикорером с герметично закрывающимися трубками, а также бокс-корером. Из последнего керны донных отложений были получены с помощью пластиковой трубки. В мелководных прибрежных районах для отбора проб использовали грунтовую трубку с вакуумным затвором. Отобранные керны донных осадков высотой до 7–32 см в зависимости от ожидаемой скорости осадконакопления резали с помощью винтового экструдера на слои толщиной 0,25, 0,5, 1, 2 см с последующим измерением активности радиоизотопов ^{238}Pu и $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ в каждом слое осадка.

Метод радиоизотопных трассеров позволяет оценивать среднемноголетнее годовое значение АМДО в масштабе десятилетий с учетом всех процессов, происходящих в толще вод и придонном слое воды, включая деструкцию и ремобилизацию взвешенного вещества, горизонтальную и вертикальную составляющую гидрологических процессов, суточные, сезонные и другие вариации в разные временные периоды, что и определяет количество осадочного вещества, осевшего и задепонированного в донные осадки. Результаты наших исследований были получены с использованием техногенных радиоизотопов плутония ^{238}Pu и $^{239} + ^{240}\text{Pu}$. Следует отметить, что использование плутония имеет ряд преимуществ относительно других радиоизотопов. Так, высокая

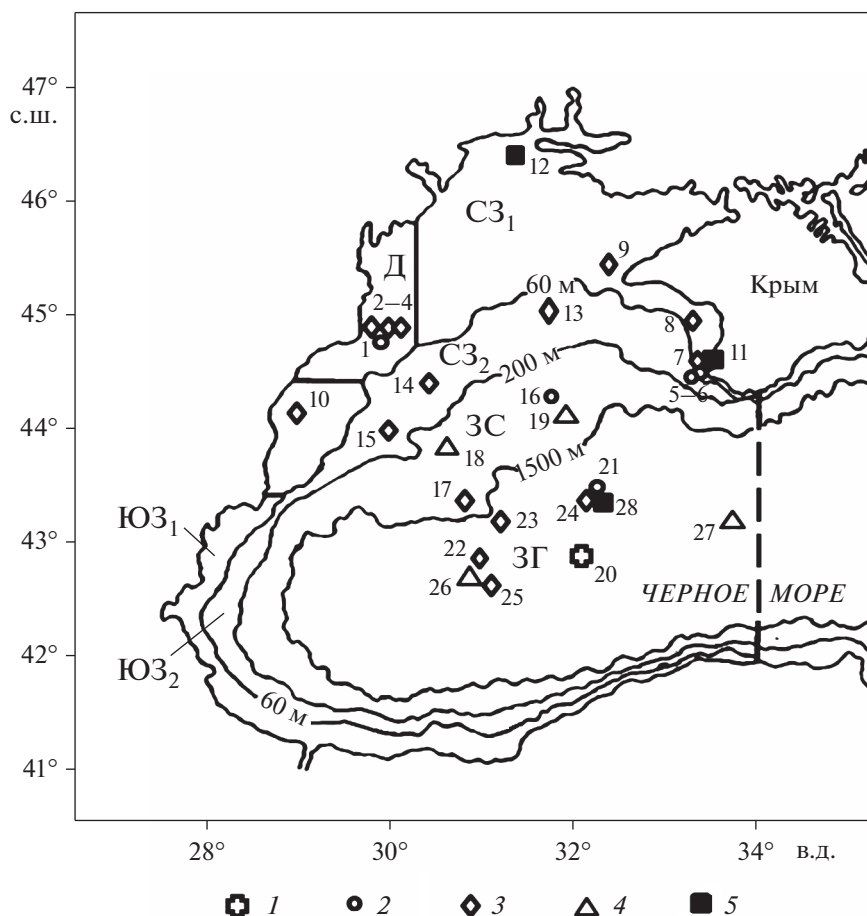


Рис. 1. Схема деления западной части Черного моря на районы, в которых определялась первичная продукция [10], и расположение в этих районах станций (1–28) по отбору проб донных отложений для определения скорости осадконакопления, где: Д – придунайский район, СЗ₁ – северо-западный шельф (<60 м); СЗ₂ – северо-западный шельф (60–200 м); ЮЗ₁ – юго-западный шельф (<60 м); ЮЗ₂ – юго-западный шельф (60–200 м); ЗС – западный континентальный склон (200–1500 м); ЗГ – западный глубоководный район (>1500 м), вертикальной штриховой линией обозначена граница западной части Черного моря. Станции соотношены в соответствии с источником натуральных данных: 1 – [38], 2 – [7, 9], 3 – [21, 43], 4 – [49], 5 – [32, 47].

чувствительность и длительный период применимости радиотрассерного метода с использованием радиоизотопов плутония ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ обеспечивается их большими по времени величинами периода полураспада ($T_{1/2} = 87, 24000, 6500$ лет соответственно), в отличие от техногенных радиоизотопов ^{90}Sr и ^{137}Cs ($T_{1/2} = 29, 30$ лет соответственно). Известно, что в Черное море после аварии на ЧАЭС в 1986 г. поступили в большом количестве антропогенные радиоизотопы плутония ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$. При этом в глобальных и чернобыльских выпадениях изотопный состав плутония существенно различался по отношению активности $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$. Для северного полушария в глобальных выпадениях это отношение в среднем составляло 0.032 на 1970 г. [39], а в чернобыльском выбросе – 0.47 на 1986 г. [37]. Таким образом, в современный период после 1986 г. появилась новая возможность датирова-

ния слоев донных осадков в Черном море по отношению активностей $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$. Кроме того, в Черном море плутоний проявляет ярко выраженный педотропный тип биогеохимического поведения: около 95% этих радиоизотопов связывается со взвесью – осадочным веществом и перераспределяется в донные отложения [31, 47].

Радиоизотопы (^{238}Pu и $^{239, 240}\text{Pu}$) в донных осадках определяли по известным методикам [28, 48]. Для оценки химического выхода плутония в пробы осадков вносили радиоизотоп ^{242}Pu . После термического и химического разложения проб дальнейшую очистку и выделение плутония проводили посредством ионообменной колоночной хроматографии [48]. Измерения активности радиоизотопов плутония (^{238}Pu и сумму $^{239+240}\text{Pu}$) проводили на альфа-спектрометре ORTEC PC (США). Концентрацию активности радиоизотопов плутония рассчитывали на сухую массу пробы

Таблица 1. Абсолютные массы донных осадков (АМДО) в пяти районах западной части Черного моря и метаданные исследованных проб

Район моря	Номер станции отбора проб осадков	Год отбора проб донных осадков и глубина моря	АМДО среднееголетнее значение на станции, г/(м ² год)	Источник первичных данных
Д – придунайский район	1	1994 г., 26 м	3994	[7]
	2, 3, 4	2000 г., 20–40 м	6300; 2700; 800	[21]
СЗ ₁ – северо-западный шельф (<60 м)	5	1998 г., 15 м	607	[7]
	6	1998 г., 22 м	664	[9]
	7, 8, 9, 10	2000 г., 60 м	607; 450; 500; 320	[21]
СЗ ₂ – северо-западный шельф (60–200 м)	13	2000 г., 100 м	125	[21]
	14	2000 г., 70 м	150	
	15	2000 г., 100 м	115	
ЗС – западный континентальный склон (200–1500 м)	16	1994 г., 607 м	138	[7]
	17	1998 г., 1375 м	41	[43]
	18	2001 г., 500 м	94	[21]
	19	2001 г., 957 м	106	[49]
ЗГ – западный глубоководный район (>1500 м)	20	1988 г., 2010 м	69	[38]
	21	1993 г., 1983 м	70	[7]
	22	2000 г., 2008 м	45	[43]
	23, 24, 25	2001 г., >1500 м	55; 55; 69	[21]
	26	2003 г., 2159 м	72	[49]
	27	2003 г., 2197 м	93	[49]

осадка в Бк/кг. Относительная ошибка измерения активности $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ в пробах донных отложений не превышала 13%. Стандартную статистическую обработку результатов проводили с использованием программы Microsoft Excel [28].

Процесс осаждения оценивали по двум параметрам [22, 25]: скорость осадконакопления (СОН, мм/год) и абсолютные массы донных осадков (АМДО, г/(м² год)) на основе результатов, полученных с помощью известной методики радиоизотопной геохронологии донных отложений [28]. Определение величин СОН проводили посредством датировки профиля осадков по трем временным точкам: 1) максимум глобальных радиоактивных выпадений после мощных термоядерных взрывов в 1963 г. при испытании ядерного оружия, 2) максимум чернобыльских атмосферных радиоактивных выпадений после аварии на ЧАЭС в 1986 г., 3) год отбора проб донных отложений [32, 48]. Далее рассчитывали СОН согласно общепринятой формуле:

$$\text{СОН} = h / (T_0 - T), \quad (1)$$

где: СОН – скорость осадконакопления, мм/год; h – глубина исследуемого слоя на разуплотненный или естественный осадок, мм; T_0 – время отбора пробы, год; T – абсолютный возраст слоя донных осадков, год [7].

На базе СОН (1) и кумулятивного веса донных отложений рассчитывали АМДО согласно формуле:

$$\text{АМДО} = [(m_{6/c} \text{СОН}) / (S_c h_c)], \quad (2)$$

где: АМДО – абсолютная масса донных осадков, г/(м² год); $m_{6/c}$ – кумулятивный вес осадка высотой h_c за вычетом солей поровой воды, г; СОН – скорость осадконакопления, мм/год; S_c – площадь поперечного сечения керна, м²; h_c – высота слоя исследуемого осадка, мм [7].

В работе рассматривались следующие составляющие АМДО: по происхождению осадочного вещества: биогенная (АМДО_{БГ}) и литогенная (АМДО_{ЛГ}) составляющие, а также в составе АМДО_{БГ} – органическое осадочное вещество (АМДО_{ОРГ}) и минерализованное биогенное осадочное вещество (АМДО_{МБГ}).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение СОН и АМДО в глубоководной области и шельфовых районах ЗЧМ с использованием радиотрассеров ^{238}Pu и $^{239} + ^{240}\text{Pu}$. Для определения СОН и АМДО были получены профили вертикального распределения ^{238}Pu и $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ в кернах донных отложений на шельфе и в глубоководной

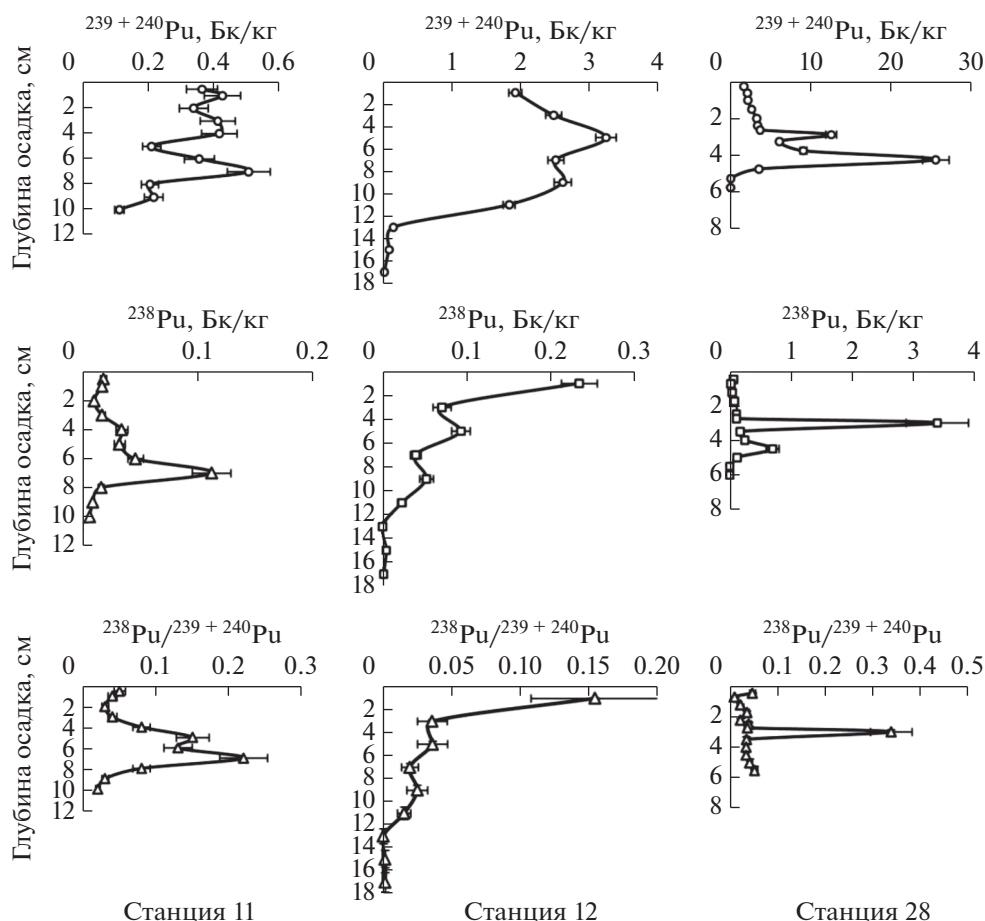


Рис. 2. Вертикальные профили $^{239} + ^{240}\text{Pu}$, ^{238}Pu и отношения активностей $^{238}\text{Pu}/^{239} + ^{240}\text{Pu}$ в ядрах донных отложений на шельфе (станции 11, 12) и в глубоководной котловине западной части Черного моря (ст. 28).

водной области ЗЧМ (станции 11, 12, 28) (рис. 1). Результаты измерений концентрации активности и расчетные значения отношения активностей этих радионуклидов представлены на рис. 2.

Как видно из приведенных данных, в отличие от профилей в глубоководной области (ст. 27), на шельфе вертикальные профили ^{238}Pu и $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ имеют в большей или меньшей степени размытую структуру (станции 11 и 12, рис. 2). Возможно, в мелководных районах это связано с процессами перемешивания и переосаждения донных отложений, преимущественно приуроченных к холодному периоду года, а также с историей поступления радионуклидов с речным стоком после аварии на ЧАЭС [8]. Поэтому только совместный анализ вертикальных профилей концентрации активности радионуклидов плутония и отношения их активностей позволяет провести геохронологию профилей, определить принадлежность максимумов к черномыльским или глобальным выпадениям и рассчитать величины, определяющие процесс осадконакопления: СОН и АМДО.

Результаты расчетов СОН и АМДО по трем исследуемым станциям представлены в табл. 2.

Полученные характеристики скорости осадконакопления показали, что их величины значительно отличались в прибрежных мелководных станциях и глубоководной области моря (табл. 2). При этом разница значений АМДО превышала порядок величин. Величины АМДО на станциях, расположенных на шельфе, различались между собой незначительно. Приведенные результаты на этих трех станциях были сопоставимы с литературными данными, полученными в этих же районах с использованием радиотрассеров ^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{90}Sr (табл. 1). СОН в шельфовых районах, полученные методом радионуклидовой геохронологии, составляли 2.5–4.1 мм/год [7, 9, 21] и были близки значениям, полученным методом постановки ловушек для шельфа Черного моря, равным в среднем 5.3 мм/год [13].

Связь величины АМДО и ПП в районах ЗЧМ. Для оценки связи между АМДО и уровнем ПП использовали среднееголетние годовые значения ПП в изучаемых районах (рис. 1) [10] и сред-

Таблица 2. Скорость осадконакопления (СОН) и абсолютные массы донных осадков (АМДО) на шельфе (ст. 11, 12) и в глубоководном районе (ст. 28) западной части Черного моря (рис. 1) в масштабе последних десятилетий, где H – глубина моря

Параметр	Характеристика исследованных станций		
	район – СЗ ₁ ст. 11, $H = 15$ м (за период с начала 60-х гг. XX века до 2007 г.)	район – СЗ ₁ ст. 12, $H = 20$ м (за период с начала 60-х гг. XX века до 2013 г.)	район – ЗГ ст. 28, $H = 2030$ м (за период с начала 60-х гг. XX века до 2013 г.)
СОН в, мм/год	2.5	4.1	0.8
АМДО, г/(м ² год)	630	702	60

Таблица 3. Среднегодовое значение первичной продукции (ПП) и абсолютных масс донных осадков (АМДО) в западной части Черного моря

Район моря	Годовые значения по районам: в числителе среднееарифметическое значение/ в знаменателе среднее значение диапазона изменения величины	
	ПП, гС/(м ² год) [10]	АМДО, г/(м ² год) (по данным табл. 1, 2)
Д	422/418	3449/3550
СЗ ₁	184/205	560/511
СЗ ₂	132/143	130/133
ЗС	125/148	95/90
ЗГ	106/139	65/69

немноголетние годовые значения АМДО, рассчитанные по результатам исследований в этих же районах (табл. 1, 2). Среднегодовое значение анализируемых величин приведены в табл. 3. В ней представлены две оценки усредненных значений АМДО и ПП по средним арифметическим величинам и средним значениям диапазона изменения величин. Рассчитанные величины АМДО по среднееарифметическим значениям и средним значениям диапазона практически не различались (табл. 3). Поэтому в дальнейших расчетах использовали среднееарифметические значения ПП и АМДО. Характеристика взаимосвязи между годовыми значениями АМДО и ПП представлена на рис. 3. Как видно на рис. 3а, связь между значениями АМДО и ПП имеет линейный пропорциональный характер с высокой степенью достоверности $R^2 = 0.99$. Аппроксимационная прямая не проходит через начало координат, а пересекает ось абсцисс (ось ПП) в области положительных значений ПП. Это характеризует наличие отклонения от прямо пропорциональной зависимости между АМДО и ПП и указывает на тот факт, что при низких значениях ПП ее вклад в формирование АМДО стремится к предельно малым величинам. Вероятнее всего, это связано с активным процессом минерализации осадочного вещества и повторным использованием минеральных биогенных веществ фито-

планктоном [27], а формирование АМДО происходит в основном за счет литогенной и биогенной минерализованной части осадочного вещества, включая предельно малые остаточные величины неокисленной части органического осадочного вещества в водной толще кислородсодержащего и H_2S -слоя.

По литературным данным о процентном соотношении биогенной (АМДО_{БГ}) и литогенной (АМДО_{ЛГ}) составляющих АМДО в исследуемых районах ЗЧМ [9] рассчитывали их вклад в суммарную величину АМДО. Аппроксимационный анализ связи этих составляющих АМДО с ПП показал, что для них (рис. 3б, 3в), как и для суммарной АМДО (рис. 3а), связь с уровнем ПП носила линейный характер. При этом угол наклона прямой, характеризующей изменения АМДО_{БГ}, был значительно меньше, чем таковой для АМДО_{ЛГ}, что свидетельствует о более значимом влиянии АМДО_{ЛГ} на изменение суммарной величины АМДО (рис. 3). Очевидно, это связано с тем, что в северо-западной части моря высокопродуктивные акватории расположены в прибрежных районах, которые находятся под влиянием стока рр. Дуная, Днепра, Буга и Днестра. Поэтому терригенное осадочное вещество, представленное в основном обломочными осадками (станции 11–13, 14), играет ведущую роль в формировании АМДО.

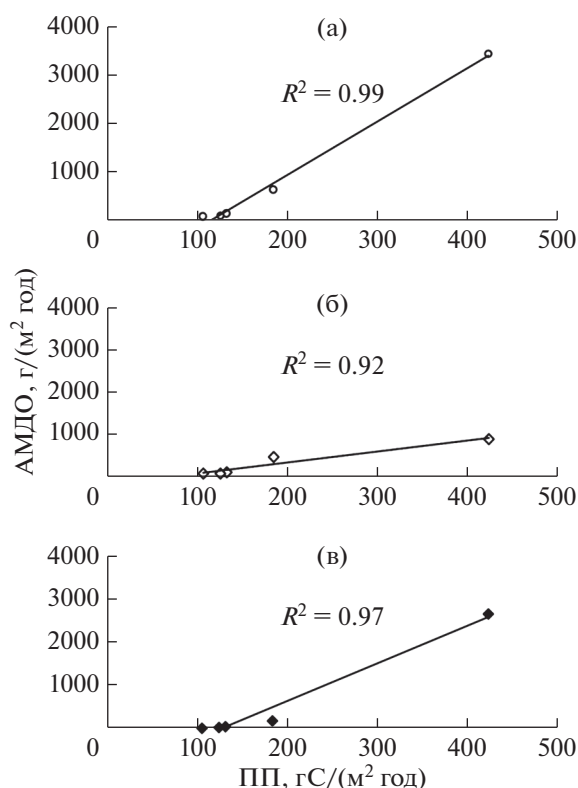


Рис. 3. Тренды изменения абсолютных масс донных осадков (АМДО) с увеличением уровня первичной продукции (ПП) в районах исследования: (а) – суммарная АМДО, (б) – биогенная составляющая часть (АМДО_{БГ}), (в) – литогенная составляющая (АМДО_{ЛГ}), где: значки – натурные данные, линия – аппроксимационная прямая, R^2 – величина достоверности аппроксимации.

Следовательно, в связи с географическими особенностями исследуемых акваторий, АМДО_{БГ} и АМДО_{ЛГ} – это две составляющие, величины которых одинаково коррелируют в этих районах моря. В шельфовых районах, подверженных влиянию стока рек, с этим стоком с одной стороны поступает большое количество литогенной взвеси, а с другой стороны, поступают биогенные элементы, способствующие увеличению ПП. В глубоководные районы ЗЧМ поступает только остаточное количество терригенного осадочного вещества, так как его основная масса оседает на шельфе, и остаточные количества биогенных элементов, которые также утилизируются фитопланктоном преимущественно на шельфе [20], вследствие чего уменьшаются абсолютные значения ПП и АМДО. Это и служит причиной сходного характера полученной связи АМДО и ее составляющих АМДО_{БГ} и АМДО_{ЛГ} с величиной ПП в ЗЧМ.

Анализ изменений величин соотношения ПП и АМДО в исследуемых районах ЗЧМ в порядке

возрастания глубины и удаленности от источников терригенного осадочного материала (табл. 4) показал, что уровень АМДО изменяется практически в одинаковое число раз синхронно с изменением ПП только в удаленных глубоководных акваториях ЗС и ЗГ при переходе от района СЗ₂ к району ЗС, а затем к району ЗГ. В приустьевых районах при переходе от района Д к районам СЗ₁ и СЗ₂ увеличение АМДО происходит в разы быстрее, чем увеличение ПП (табл. 4). Разница в изменении указанных отношений между районами Д и ЗГ превышает один порядок величин и указывает на ведущее влияние терригенной взвеси, приносимой Дунаем, на величину АМДО в районе Д и СЗ₁ и СЗ₂, убывающую с глубиной района (табл. 4). Очевидно, что в этом случае имеет место влияние и других рек, впадающих в северо-западную часть моря, но по масштабу влияния ведущую роль играет р. Дунай. Это подтверждается при сравнении величин твердого стока рек, который у Дуная составляет величину, более чем на порядок превышающую сток Днепра – 6.8×10^7 и 2.12×10^6 т/год соответственно [14]. Следует отметить, что существенное влияние оказывает тот факт, что каскад водохранилищ на р. Днепр и Днепро-Бугский лиман служат буферными акваториями для Черного моря, аккумулируя в себе основную часть осадочного материала из водосборного бассейна Днепра. Это подтверждает и сравнение величин АМДО на взморье Дуная (3449 г/(м² год), станции 1–4, табл. 1), в Днепро-Бугском лимане (3670 г/(м² год) [7]) и на взморье Днепра (702 г/(м² год), ст. 12, табл. 2). Кроме того, проведенный ранее анализ многолетних данных в СЗЧМ по изменению потоков биогенных элементов, хлорофилла “а” и биомассы фитопланктона показал существенное влияние стока рек на эти величины в приустьевых областях и мелководной части шельфа (СЗ₁) и их убывание с увеличением глубины и удаленности от устьевых районов [20]. Поэтому к существенным географическим особенностям исследованных районов моря следует отнести наличие в северо-западной части моря пологого удлиненного шельфа. Наряду с другими особенностями, он играет важную роль в формировании количественных показателей АМДО и ПП. Таким образом, совокупность условий и процессов, протекающих в этих акваториях, приводит к тому, что ведущую роль ПП играет в формировании величины АМДО только в районах ЗС и ЗГ.

Роль осадочного органического вещества и его преобразования в толще вод в формировании АМДО в глубоководной области ЗЧМ. В формировании АМДО к основным составляющим осадочного вещества относят: автохтонное осадочное органическое вещество (ОВ) и аллохтонное терригенное осадочное вещество [17, 22, 30], которые и

Таблица 4. Кратность увеличения величин первичной продукции (ПП) и абсолютных масс донных осадков (АМДО) от района к району в западной части Черного моря

Сравниваемые исследованные районы моря (согласно рис. 1)	Кратность увеличения величин	
	ПП	АМДО
Д/СЗ ₁	2.3	6.2
СЗ ₁ /СЗ ₂	1.4	4.3
СЗ ₂ /ЗС	1.1	1.4
ЗС/ЗГ	1.2	1.5
Д/ЗГ	4.0	53.1

определяют его количество в прибрежных районах и в открытой части Черного моря. Вклад ВОВ в формирование АМДО в глубоководных районах оценивали по результатам исследований седиментационных потоков взвешенного органического углерода ($C_{\text{ВОВ}}$) [41], взвешенного органического азота ($N_{\text{ВОВ}}$) [45] и взвешенного органического фосфора ($P_{\text{ВОВ}}$) в кислородсодержащем слое и в верхнем слое H_2S -зоны Черного моря [27, 41, 45,] и океанических водах [42, 44].

Анализ результатов этих исследований показал, что в черноморских и океанических водах в слое 0–350 м с увеличением глубины наблюдается общая тенденция закономерного уменьшения величин потоков осаждения $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$. При этом величины отношения $C_{\text{ВОВ}} : N_{\text{ВОВ}}$ и $C_{\text{ВОВ}} : P_{\text{ВОВ}}$ с увеличением глубины были близки, что указывает на сопряженность потоков $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ и отсутствие их избирательной минерализации в процессе седиментации [27, 42, 44, 45]. В отличие от океанических вод, где кислород присутствует во всей толще вод до дна, в Черном море наиболее интенсивный процесс минерализации органического вещества отмечается в относительно небольшом по толщине кислородсодержащем слое [27, 42, 45]. Согласно данным [42], в кислородсодержащем слое ЗЧМ уровень минерализации $C_{\text{ВОВ}}$ составлял 95% от годовой величины ПП. Примерно такие же величины уровня минерализации $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$, равные 92 и 96%, были получены в южной части Черного моря и его глубоководной области моря соответственно [27, 45]. Следовательно, из кислородсодержащего слоя в глубинные воды H_2S -зоны доля потоков осаждения $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ составляла всего лишь 5, 8 и 4% от годовой величины ПП, выраженной в углеродных, азотных и фосфорных единицах соответственно [27, 42, 45]. Таким образом, в результате минерализации и биохимической трансформации (выедания зоопланктоном) ВОВ в кислородсодержащем слое глубоководной области моря только малая часть рассеянного осадочного вещества может перейти в донные осадки.

Учитывая сопряженность потоков $C_{\text{ВОВ}}$, $N_{\text{ВОВ}}$ и $P_{\text{ВОВ}}$ и отсутствие их избирательной минерализации в процессе седиментации и использование при переходе от величин ПП, выраженной в $гС/(м^2 \text{ год})$, к потокам взвешенного вещества в единицах сухого веса $г/(м^2 \text{ год})$, в дальнейших расчетах использовали величину потока $C_{\text{ВОВ}}$, равную 5.0% от годовой величины ПП [42]. Для оценки вертикального потока $C_{\text{ВОВ}}$ в весовом выражении из кислородсодержащего слоя в воды H_2S -зоны в ЗЧМ с глубиной >1500 м (район ЗГ, станции 20–28 на рис. 1) годовую величину ПП принимали равной 106 $гС/(м^2 \text{ год})$ (табл. 3) [10]. При пересчете $C_{\text{ВОВ}}$, выраженного в $мгС$ на сухой вес взвешенного вещества принимали, что 1 $мгС$ эквивалентен 3.2 $мг$ сухого веса взвеси [4]. Тогда в весовых единицах вертикальный поток осадочного вещества составляет 17.0 $г/(м^2 \text{ год})$ (на сухой вес). В акватории континентального западного склона (200–1500 м) (район ЗС, станции 16–19 на рис. 1) при годовой величине ПП, равной 125 $гС/м^2 \text{ год}$ (табл. 3) [10] величина этого потока в весовых единицах в верхнем слое H_2S -зоны составляет 20.0 $г/(м^2 \text{ год})$.

В водах анаэробной зоны при полном отсутствии растворенного кислорода и наличии восстановленных форм химических соединений (H_2S , NH_4 , CH_4) [35, 36] процесс окисления осадочного вещества часто связывают с кислородом сульфатов, образующимся в результате жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий [4, 19]. В связи с этим, можно предположить, что в водах H_2S -слоя при отсутствии растворенного кислорода между процессами минерализации осадочного вещества и образованием продукции хемосинтезирующих бактерий устанавливается динамическое равновесие, что стабилизирует количество ОВ, осаждающегося на дно. Подтверждением этому служат результаты исследований в водной толще H_2S -слоя Черного моря, где при изучении вертикального распределения взвеси с увеличением глубины отмечалось практически постоянное ее количество [17].

Следовательно, особенностью формирования величины АМДО на северо-западном шельфе и в глубоководной области ЗЧМ являются как процессы преобразования ОВ, так и биогеографические характеристики районов. Это, прежде всего, удаленность от источников терригенной взвеси и уровень ПП, а также гидрологические и гидрохимические условия, поддерживающие в Черном море существование H_2S -слоя, обеспечивая динамическое равновесие между кислородсодержащей и сероводородной толщами вод; наличие в толще черноморских вод постоянного галоклина, холодного промежуточного слоя, сезонного термоклина и ряда других особенностей вертикальной структуры солености, плотности и температуры, а также существование верхнего опресненного и мощного нижнего осолоненного квазиоднородного слоев вод, разделенных постоянным галоклином [2].

В глубоководной области моря большой вклад в формирование АМДО вносит биогенное минерализованное осадочное вещество (АМДО_{БГМ}) [7, 17, 26, 40]. Ранее было показано, что в летний сезон биогенные карбонаты (створки кокколитофорид) могут составлять до 87% сухой массы донных отложений в глубоководной области Черного моря [40], но в разные сезоны и в разные годы их доля существенно изменяется [27]. В зимне-весенний период к основному компоненту АМДО_{БГМ}, оседающему из кислородсодержащего слоя в глубинные воды H_2S -зоны, относятся силикатные створки диатомовых водорослей [6]. Оценка роли АМДО_{БГМ} по среднесезонной годовой скорости седиментации взвешенного вещества на дно содержит в себе осредненные годовые и сезонные колебания величины АМДО_{БГМ}. Очевидно, что в водной толще глубоководной области моря АМДО_{БГМ} вносит существенный вклад в формирование АМДО. Эта особенность формирования АМДО характерна для Черного моря как меромиктического водоема с сероводородной толщей глубинных вод и ограниченным верхним слоем вод (до глубины 150–200 м), пригодным для обитания оксибионтов. Согласно литературным данным, количество литогенного и биогенного осадочного вещества в ЗЧМ связано с глубиной моря [9] и удаленностью исследуемых районов от берега и от устьев крупных рек (табл. 3, рис. 1).

Ранее было показано, что основная часть твердого стока рек и абразивного материала (порядка 90%) оседает на шельфе, частично достигая глубоководного склона, и практически не влияет на количество осадочного материала в океанической пелагиали и глубоководной котловине моря [1, 12, 22]. Следовательно, в глубоководной области Черного моря осадочный материал состоит в основном из биогенного осадочного вещества

(АМДО_{БГ}) [9, 17]. Учитывая эти данные и результаты по определению количества автохтонного ОВ и процента его окисления в процессе седиментации из водной толщи на дно в глубоководной области моря, нами были рассчитаны вклады биогенного (органического и минерализованного АМДО_{БГ}) и литогенного (АМДО_{ЛГ}) осадочного вещества в формирование АМДО (табл. 5).

Оценки вклада трех составляющих в формирование АМДО свидетельствуют, что вклад по массе взвешенного органического вещества на континентальном склоне по сравнению с глубоководной котловиной моря увеличивался незначительно – на 3 г/(м² год), но его процентная доля уменьшалась на 5.1% (табл. 5). Процентная доля АМДО_{БГМ} в глубоководной котловине была почти на 15% больше таковой на континентальном склоне, а процентный вклад литогенной составляющей уменьшался в 5 раз. При этом показатели абсолютных масс органического и минерализованного осадочного вещества были меньше на 3 и 6.83 г/(м² год) в глубоководной котловине. Доля же литогенного осадочного вещества, как в процентном, так и в массовом выражении уменьшалась (табл. 5). Следовательно, тенденции изменения абсолютных масс составляющих осадочного вещества, формирующих АМДО, имеют ту же направленность: самый высокий вклад вносит АМДО_{БГМ}, а вклад литогенного вещества становится минимальным, уменьшаясь в 6.8 раза. Это подтверждает, что уменьшение АМДО в глубоководной зоне происходит в основном за счет уменьшения поступления литогенного вещества. Изменение вклада биосинтетических и биогеохимических деструктивных процессов менее выражено, что, вероятно, обусловлено восстановительными условиями в водной толще H_2S -слоя и, как отмечалось выше, динамическим равновесием между процессом минерализации осадочного вещества и продукцией хемосинтезирующих бактерий (новообразованного осадочного вещества).

Роль биогенной и литогенной составляющей в формировании АМДО в разных районах ЗЧМ. Полученные результаты (табл. 4, 5) подтверждают определяющее влияние биогеографических условий на формирование АМДО в разных районах ЗЧМ. К основным из них относятся: 1) наличие стока крупных рек, 2) удаленность акватории от приустьевых участков, 3) пологий удлиненный шельф (рис. 1), что обеспечивает оседание основного количества терригенного осадочного материала на шельфе; 4) удаленность акваторий от берега в сторону глубоководной области моря – увеличение глубины моря, 5) различные уровни ПП, 6) обеднение биоты в H_2S -зоне глубоководной области моря вследствие отсутствия кислорода, 7) наличие восстановительных условий в H_2S -зоне и ряда особенностей структуры вод, как

Таблица 5. Вклад составных частей осадочного вещества в формирование абсолютных масс донных отложений (АМДО) на глубоководном склоне (ЗС) и в глубоководной котловине (ЗГ) в западной части Черного моря

Составные части осадочного вещества, формирующие АМДО			Вклад составных частей в формирование АМДО в глубоководных районах моря	
			ЗС	ЗГ
Литогенная часть (АМДО _{ЛГ})	% от АМДО [9]		25.0	5.4
	массовая доля в АМДО, г/м ² год		23.7	3.5
Биогенная часть (АМДО _{БГ})	% от АМДО [9]		75.0	94.6
	массовая доля в АМДО, г/(м ² год)		71.3	61.5
Состав биогенной части (АМДО _{БГ})	осадочное органическое вещество (АМДО _{ОРГ})	% от АМДО _{БГ}	28.1	27.6
		% от АМДО	21.0	26.1
		массовая доля в АМДО, г/(м ² год)	20.0	17.0
	биогенное минерализованное осадочное вещество (АМДО _{БГМ})	% от АМДО _{БГ}	71.9	72.4
		% от АМДО	54.0	68.5
		массовая доля в АМДО, г/(м ² год)	51.3	44.5

Таблица 6. Вклад биогенной части абсолютных масс донных отложений (АМДО_{БГ}) и литогенной (АМДО_{ЛГ}) составляющей в формирование АМДО и отношение их величин (АМДО_{БГ}/АМДО_{ЛГ}) на шельфе и в глубоководной области в разных группах акваторий по характеру формирования АМДО в западной части Черного моря

Район исследования (согласно рис. 1)	Процентная доля составляющих АМДО, % [9]		Массовая доля составляющих АМДО, г/(м ² год)		Отношение величин АМДО _{БГ} /АМДО _{ЛГ} и (№ группы акватории)
	АМДО _{БГ}	АМДО _{ЛГ}	АМДО _{БГ}	АМДО _{ЛГ}	
Д	24.6	75.4	848	2601	0.3 ≤ 1(I)
СЗ ₁	72.6	27.4	407	153	2.7 ≤ 3 (II)
СЗ ₂	70.5	29.5	92	38	2.4 ≤ 3 (II)
ЗС	75	25	71.3	23.7	3.0 ≤ 3 (II)
ЗГ	94.6	5.4	61.5	3.5	17.6 > 15(III)

было отмечено выше. Все эти условия оказывают влияние на поступление и распространение аллохтонного терригенного осадочного материала, а также образование и трансформацию автохтонного органического осадочного вещества в исследуемых акваториях Черного моря. В целом в ЗЧМ можно выделить 3 группы акваторий, отличающихся по характеру формирования АМДО: I – приустьевая область (Д); II – шельфовые районы (СЗ₁ и СЗ₂) и континентальный склон (ЗС); III – глубоководная область моря (ЗГ) (табл. 6).

Отношение величины биогенной и литогенной составляющих АМДО (АМДО_{БГ}/АМДО_{ЛГ}) увеличивалось не меньше, чем в 3–5 раз при переходе от одной группы акваторий к другой группе. В первой группе оно не превышало – 1, во второй – 3, и в третьей – было выше 15 единиц. При этом уменьшение доли литогенного вещества происходит не за счет увеличения ПП в этих рай-

онах, а в результате резкого уменьшения поступления литогенного осадочного вещества (табл. 6).

Поэтому при достаточно близких значениях ПП в районах континентального склона и глубоководной котловины моря относительный вклад биогенного осадочного вещества в формирование АМДО в глубоководной котловине моря увеличивался и достигал 94.6% [9]. Это связано с минимальным поступлением аллохтонного литогенного вещества в эту область моря и, как следствие, возрастанием относительного вклада органического осадочного вещества, доля которого достигала 26.1% от АМДО. При этом относительный вклад АМДО_{БГМ} составлял в глубоководной области 54–68.5% от АМДО, что близко к оценке этой величины, изменявшейся в пределах 37–50%, в слое 0–4 см донных отложений в абиссали Черного моря [46].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе обобщения собственных и имеющихся в литературе данных установлено, что особенности формирования АМДО в исследуемых районах северо-западного шельфа и глубоководной области ЗЧМ определяются комплексом биогеографических условий, включая гидрологические и гидрохимические особенности Черного моря. Оценить характер формирования АМДО можно с использованием величин отношения биогенной и литогенной составляющих осадочного вещества, которые отражают изменение их роли в седиментогенезе в исследованных районах.

В приустьевых районах и на шельфе в смежных районах моря увеличение значений АМДО (в 4.3–6.2 раз) было выше по сравнению с увеличением уровня ПП (в 1.4–2.3 раза) в отличие от глубоководных районов, где кратность увеличения как ПП, так и АМДО была близка к единице.

По характеру формирования среднесезонных годовых значений АМДО и снижению их абсолютных величин от прибрежных районов северо-западного шельфа до континентального склона и глубоководной котловины ЗЧМ выделены 3 группы районов, в которых отношение вклада биогенного и литогенного осадочного вещества от группы к группе возрастало не менее чем в 3–5 раз. Величины отношений в I, II и III группе изменялись от $AMDO_{БГ}/AMDO_{ЛГ} \leq 1$ (I группа) и $1 < AMDO_{БГ}/AMDO_{ЛГ} \leq 3$ (II группа) до $AMDO_{БГ}/AMDO_{ЛГ} > 15$ (III группа). Значения АМДО повышались в направлении от глубоководной котловины к приустьевым районам от 65 до 3449 г/(м² год).

Взаимосвязь между значениями АМДО (как суммарной, так и отдельно биогенной и литогенной ее составляющими) и величинами ПП носила линейный характер. При этом ПП не является определяющим фактором в формировании АМДО в приустьевых районах и на шельфе, но играет ведущую роль в глубоководной области ЗЧМ.

Особенность формирования АМДО в глубоководной области Черного моря связана с наличием H₂S-зоны. При уменьшении абсолютных значений АМДО в глубоководной котловине ЗЧМ относительная роль биогенного осадочного вещества в процессе формирования АМДО возрастала. При этом на континентальном склоне доля органического осадочного вещества составляла 21%, а в глубоководной котловине – 26.1% от величины АМДО. Наибольший вклад в формирование донных осадков был характерен для биогенного минерализованного осадочного вещества (АМДО_{БГМ}). На континентальном склоне он составлял 54%, а в глубоководной котловине моря – 68.5% от АМДО.

Источники финансирования. Работа подготовлена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ тема НИР № 0828–2018–0006 “Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем” номер гос. регистрации АААА-А18-118020890090-2 и по теме НИР № 0828-2019-0003 “Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом” номер гос. регистрации АААА-А18-118021490093-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 271 с.
2. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
3. Ведерников В.И., Демидов А.Б. Вертикальное распределение первичной продукции и хлорофилла в различные сезоны в глубоководных районах моря // Океанология. 1997. Т. 37. № 3. С. 414–423.
4. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А. Функционирование планктонных сообществ эпипелагиали океана. М.: Наука, 1987. 240 с.
5. Виноградов М.Е., Сапожников В.В., Шушкина Э.А. Экосистема Черного моря. М.: Наука, 1992. 112 с.
6. Гулин С.Б. Оценка интенсивности биоседimentации в Черном море с помощью уран-ториевого метода // Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. С. 480–498.
7. Гулин С.Б., Егоров В.Н., Стокозов Н.А., Мирзоева Н.Ю. Определение возраста донных отложений и оценка скорости осадконакопления в прибрежных и глубоководных акваториях Черного моря с использованием природных и антропогенных радионуклидов // Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. С. 499–503.
8. Гулин С.Б., Мирзоева Н.Ю., Егоров В.Н. и др. Вторичное загрязнение Черного моря техногенными радионуклидами после аварии на Чернобыльской АЭС // Докл. Нац. АН Украины. 2013. № 10. С. 184–191.
9. Гулин С.Б., Сидоров И.Г., Гулина Л.В. Биогенная седimentация в Черном море: радиотрассерное исследование // Морской эколог. журнал. 2013. Т. 12. № 2. С. 19–25.
10. Демидов А.Б. Сезонная изменчивость и оценка годовых величин первичной продукции фитопланктона в Черном море // Океанология. 2008. Т. 48. № 5. С. 718–733.
11. Денисов В.И. Потоки взвешенного вещества в прибрежной части шельфа в российском секторе Черного моря // Система Черного моря. М.: Научный мир, 2018. С. 397–425.
12. Денисов В.И., Латун В.В. Потоки химических элементов в составе осаждающегося взвешенного вещества на шельфе Черного моря (по данным седи-

- ментационных ловушек) // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2018. № 4. С. 77–85.
13. Денисов В.И., Хрусталеv Ю.П., Черноусов С.Я. Некоторые особенности и закономерности седиментогенеза в северо-западной части Черного моря (вещественный состав и распределение взвеси) // Океанология. 1990. Т. 30. Вып. 2. С. 288–294.
 14. Джаошвили Ш. Реки Черного моря: Техн. отчет № 71. Европейское агентство по охране окружающей среды, 2002. 58 с.
 15. Егоров В.Н., Гулин С.Б., Поповичев В.Н. и др. Биогеохимические механизмы формирования критических зон в Черном море в отношении загрязняющих веществ // Морской экологический журн. 2013. Т. 12. № 4. С. 5–26.
 16. Емельянов В.А., Митропольский А.Ю., Наседкин Е.И. и др. Геоэкология черноморского шельфа Украины. Киев: Академперіодика, 2004. 296 с.
 17. Кловиткин А.А., Кравчишина М.Д., Лисицын А.П. и др. Вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества в глубоководной части Черного моря // Система Черного моря. М.: Научный мир, 2018. С. 350–396.
 18. Ковалева И.В. Межгодовые и сезонные изменения концентрации хлорофилла “а”, и первичной продукции в глубоководной части Черного моря // Гидробиол. журнал. 2014. Т. 50. № 3. С. 38–50.
 19. Коновалов С.К., Еремеев В.Н. Региональные особенности, устойчивость и эволюция биохимической структуры вод Черного моря // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2012. С. 273–299.
 20. Кукушкин А.С., Пархоменко А.В. Вариабельность взвешенного органического фосфора в северо-западной части Черного моря // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 1–17.
 21. Лантев Г.В., Войцехович О.В. Перспективы радиометрического датирования как базового инструмента морской литодинамики // Литодинамика донной контактной зоны океанов: Материалы Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения проф. В.В. Лонгинова М.: ГЕОС, 2009. С. 151–156.
 22. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 392 с.
 23. Лисицын А.П. Седиментосистемы океана: Новый подход к изучению глобальных и региональных загрязнений // Вест. АН СССР. 1989. № 4. С. 57–67.
 24. Лисицын А.П., Демина Л.Л., Гордеев В.В. и др. Биогеохимия океана / Отв. ред. Монин А.С., Лисицын А.П. М.: Наука, 1983. 368 с.
 25. Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Алиев Р.А. и др. Сравнительное изучение вертикальных потоков взвеси из водной толщи, скоростей осадкообразования и абсолютных масс донных осадков в Белом море (бассейн Северного Ледовитого океана) // Докл. РАН. 2015. Т. 465. № 4. С. 489–493.
 26. Микаэлян А.С., Силкин В.А., Паутова Л.А. Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // Океанология. 2011. Т. 51. № 1. С. 45–53.
 27. Пархоменко А.В., Кукушкин А.С. Седиментационный поток взвешенного органического фосфора в пелагиали Черного моря // Океанология. 2018. Т. 58. № 2. С. 258–268.
 28. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б. и др. Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. 667 с.
 29. Проскурнин В.Ю., Терещенко Н.Н., Чужикова-Проскурнина О.Д. Геохронологическая реконструкция депонирования плутония в глубоководных донных отложениях Черного моря // Радиационная биология. Радиоэкология. 2018. Т. 58. № 6. С. 664–670.
 30. Скопинцев Б. А. Формирование современного химического состава Черного моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 336 с.
 31. Терещенко Н.Н. Ведущая роль донных отложений в перераспределении плутония в черноморских экосистемах // Наукові праці: науково-методичний журнал. Техногенна безпека. 2011. Т. 169. № 157. С. 63–70.
 32. Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю., Гулин С.Б., Параскив А.А. Геохронологическая реконструкция седиментационных потоков техногенного плутония на основе радиоизотопного определения скорости седиментации взвешенного вещества в осадки на полувекровом масштабе // Система Черного моря. М.: Научный мир, 2018. С. 641–659.
 33. Финенко З.З., Суслин В.В., Чурилова Т.Я. Оценка продуктивности фитопланктона Черного моря по спутниковым данным // Докл. РАН. 2010. Т. 432. № 6. С. 845–848.
 34. Христофорова Н.К., Журавель Е.В., Миронова Ю.А. Рекреационное воздействие на залив Восток (Японское море) // Биол. моря. 2002. Т. 28. № 4. С. 300–303.
 35. Часовников В.К. Особенность вертикального распределения гидрохимических параметров в Черном море // Комплексные исследования Черного моря. М.: Научный мир, 2011. С. 224–239.
 36. Якушев Е.В., Лукашев Ю.Ф., Часовников В.К., Чжу В.П. Современное представление о вертикальной гидрохимической структуре редокс-зоны Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 119–133.
 37. Aarkrog A. The radiological impact of the Chernobyl debris compared with that from nuclear weapons fallout // J. Environ. Radioact. 1988. V. 6. P. 151–162.
 38. Buesseler K.O., Benitez C.R. Determination of mass accumulation rates and sediment radionuclide inventories in the deep Black Sea // Deep-Sea Res. 1994. V. 11. № 12. P. 1605–1615.
 39. Hardy E.P., Krey P.W., Nolchor H.L. Global Inventory and Distribution of Fallout Plutonium // Nature. 1973. V. 241. № 5390. P. 444–445.
 40. Hay B.J., Honjo S., Kempe S. et al. Interannual variability in particle flux in the southwestern Black Sea // Deep-Sea Res. 1990. V. 37. № 6. P. 911–928.

41. *Karl D.M., Knauer G.A.* Microbial production and particle flux in the upper 350 m of the Black Sea // *Deep-Sea Res.* 1991. V. 38. P. 921–942.
42. *Knauer G.A., Martin J.H., Bruland K.W.* Fluxes of particulate carbon, nitrogen and phosphorus in the upper water column of the northeast Pacific // *Deep-Sea Res.* 1979. V. 26. P. 97–108.
43. *Laptev G., Voitsekhovitch O., Kostezh A., Osvath I.* Mass accumulation rates and fallout radionuclides ^{210}Pb , ^{137}Cs and ^{241}Am inventories determined in radiometrically dated abyssal sediment of the Black Sea // International conference on isotopes in environmental studies – Aquatic forum. 2004. Monaco, iaea-cn-118.
44. *Martin J.H., Knauer G.A., Karl D.M., Broenkow W.W.* VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific // *Deep-Sea Res.* 1987. V. 34. P. 267–285.
45. *McCarthy J.J., Yilmaz A., Coban-Yildiz Y., Nevins J.L.* Nitrogen cycling in the offshore waters of the Black Sea // *Estuarine, Coastal Shelf Sci.* 2007. V. 74. P. 493–514.
46. *Pilskaln C.H., Pike J.* Formation of Holocene sedimentary laminae in the Black Sea and the role of the benthic flocculent layer // *Paleoceanography.* 2001. V. 16. № 1. P. 1–19.
47. *Tereshchenko N.N., Gulin S.B., Proskurnin V.Yu.* Distribution and migration of $^{239,240}\text{Pu}$ in abiotic components of the Black Sea ecosystems during the post-Chernobyl period // *J. of Environmen. Radioact.* 2018. № 188. P. 67–78.
48. *Tereshchenko N.N., Proskurnin V.Yu., Paraskiv A.A., Chuzhikova-Proskurnina O.D.* Man-made plutonium radioisotopes in the salt lakes of the Crimean peninsula // *Chinese Journal of Oceanology and Limnology.* 2018. V. 36. № 6. P. 1917–1929.
49. *Yücel M., Moore W.S., Butler I.B. et al.* Recent sedimentation in the Black Sea: New insights from radionuclide distributions and sulfur isotopes // *Deep Sea Res., Part I.* 2012. V. 66. P. 103–113.

Features of Formation of the Sedimentation Rate and the Mass Accumulation Rate in the Western Black Sea Bottom Sediments

N. N. Tereshchenko^{a, #}, A. V. Parkhomenko^{a, ##}

^aFederal Research Center “Kovalevskii Institute of biology of the southern seas RAS”, Sevastopol, Russia

[#]e-mail: ntereshchenko@yandex.ru

^{##}e-mail: parkhomenko.al@yandex.ua

The article is devoted to studying of the features of sedimentation to the bottom on the northwestern shelf and in the western deep-water area of the Black Sea based on an analysis of our own and published data obtained by the bottom sediment radioisotope geochronology method. It was defined that the relationship between the mass accumulation rate and primary production was linear one, due to the complex of biogeographic, hydrological and hydrochemical conditions. Features of the bottom sediment formation in the open part of the sea were associated with the presence of hydrogen sulfide (H_2S) in deep waters (deeper than 100–200 m). It was shown that 20 (on the continental slope) and 17 $\text{g}/(\text{m}^2 \text{ year})$ of particulate organic matter (in the deep-sea basin) entered from the oxygen-containing zone. In this case, the predominant fractions in the bottom sediment were mineralized biogenic matter: 54 and 68.5%, respectively in these areas. The contribution of organic, mineralized biogenic and lithogenic sedimentary matter to the formation of mass accumulation rate was estimated and the changes in their ratio with the distance from the coast and estuaries were shown. According to the nature of the formation of mass accumulation rate 3 groups of the sea areas were identified in which the ratio of biogenic and lithogenic components in absolute masses reflected a change in the role of these components in the bottom sediment formation.

Keywords: Black Sea, bottom sediments, mass accumulation rates, sedimentation rates, primary production