

ОЦЕНКА ПОСТАВКИ КАРБОНАТНОГО УГЛЕРОДА МОЛЛЮСКАМИ В ПРИБРЕЖНУЮ ЗОНУ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА ЧЕРНОГО МОРЯ В 2008–2023 ГГ.

© 2025 г. Г. А. Колычкина^{1,*}, И. В. Любимов^{1,2}, В. Ю. Федулов¹,
Н. А. Данилова^{1,3}, Н. А. Беляев¹

¹Институт океанологии имени П. П. Шишова РАН, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА им. К. И. Скрябина”

³Department of Biology, University of Padova, Padova, Italy

*e-mail: kolyuchkina.ga@ocean.ru

Поступила в редакцию 13.10.2024 г.

После доработки 03.11.2024 г.

Принята к публикации 22.11.2024 г.

Выполнена количественная оценка масс карбонатного углерода, поступающего в донные осадки северо-восточного шельфа и склона Черного моря в результате жизнедеятельности бентосных моллюсков. Наиболее эффективные глубины образования карбонатного вещества моллюсками: 10–15 м и 60–70 м. Глубже 80 м вклад этого источника в поставку биогенного карбоната в осадки резко падает. Выявлена пространственная и временная неоднородность распределения биомасс и поставки карбонатного углерода моллюскам и в пределах одного и того же пояса глубин. Наибольшие колебания величин поставки отмечаются в наиболее продуктивной по карбонатам зоне: глубины от 10 до 30 м.

Ключевые слова: цикл углерода, неорганический углерод, моллюски, шельф, материковый склон, Черное море

DOI: 10.31857/S0030157425030085, **EDN:** GWFOFS

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших вопросов цикла углерода, который вносит наибольшую неопределенность в балансовые расчеты и модели биогеохимического круговорота углерода и биофильных элементов в океане, является оценка масс органического и неорганического углерода, захораниваемых на шельфе, континентальном склоне, в области его подножия и на ложе океана [25]. Основные сложности связаны с многофакторностью процессов и их взаимодействий при оценке синтеза, потоков и обмена карбонатным веществом между всеми основными резервуарами Земли. Наиболее подробно изучены процессы осаждения карбонатов и их распределение на дне, а скорости и масштабы суммарного биосинтеза карбонатов, роли планктона и бентоса в геохимии карбонатов определены плохо [22, 40]. Основные модели карбонатного цикла строятся для открытых вод Мирового океана, тогда как шельфовые

области остаются малоисследованными. Однако на прибрежную и шельфовую (неритическую) среду, составляющую всего 7% от площади Мирового океана, приходится более половины глобального накопления карбоната [37]. Это связано с тем, что именно в этих районах находятся наиболее продуктивные сообщества карбонатообразующих организмов бентоса (кораллов, моллюсков и др.) и планктона (кокколитофорид, фораминифер и др.), что обусловлено интенсивным поступлением биогенов с терригенным стоком [42].

Несмотря на ведущую роль тропических областей в синтезе и захоронении карбонатов, шельф умеренных широт также играет существенную роль в этом процессе и в поставке карбонатов в глубинные области океанов [50]. Как и многие шельфы, шельф Черного моря населен бентосными сообществами с доминированием моллюсков [11, 14, 16]. В северо-восточном секторе моря эти организмы населяют пояс глубин от уреза воды

до 100–120 м [16]. На широком участке шельфа (от Керченского пролива до п-ова Абрау) этот пояс достигает в ширину десятков километров, на узком (от п-ова Абрау до Адлера) – 5–7 км. Работы, посвященные оценкам объемов ежегодного поступления биогенного карбоната в результате отмирания моллюсков в прибрежной области Черного моря, немногочисленны и касаются прежде всего роли моллюсков в образовании биогенного песка в районе Анапской пересыпи, преимущественно в поставки карбонатов на пляжи [13, 19, 20]. Часть раковинного материала, поставляемого моллюсками, захоранивается в осадках, а часть (из прибрежных областей) выносится на мелководья и пляжи, истирается и становится источником карбонатного песка [20]. В этом районе около 11% песка представлено биогенными карбонатами (переработанными морем остатками раковин моллюсков) [20]. Работ, касающихся оценок поступления биогенного карбоната из бентосного источника в донные осадки других районов российского сектора Черного моря, нам найти не удалось. Наиболее близкой к исследуемой теме является оценка продуктивности двустворчатых моллюсков [9, 27 и др.]. Однако все эти исследования имеют цель оценить состояние сообществ и продукции кормового бентоса, но не поставку бентосным сообществом карбонатов в осадки, – которая не предполагает площадных расчетов поставки карбонатов моллюсками. Кроме того, в начале XX в. численность и биомасса моллюсков северо-востока Черного моря подвергались многократным ежегодным колебаниям [21], что определяет актуальность привлечения современных данных для выполнения расчетов.

Таким образом, доступные литературные источники не позволяют оценить вклад моллюсков северо-восточной части Черного моря в поставку карбонатного углерода в осадки. А интегральные оценки потоков карбонатного углерода из бентосных сообществ необходимо проводить на основании долговременных измерений обилия бентоса, поскольку экосистемы прибрежных шельфовых районов находятся под сильным антропогенным прессом и оказываются наиболее подверженными последствиям изменения климата, эвтрофикации, загрязнения и вселения новых чужеродных видов. Поэтому целью настоящей работы была оценка поставки моллюсками карбонатного углерода в донные осадки на северо-восточном побережье Черного моря с выделением наиболее эффективных районов

и глубины образования карбонатного вещества моллюсками и оценкой изменчивости величин поставок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Физико-географическое описание района исследований. Район исследования ограничен координатами 44–45° с. ш. и 36.6–39° в. д. и представляет собой участок шельфа и самую верхнюю часть склона от Бугазской косы до пос. Макопсе. Южнее п-ова Абрау ширина шельфа не превышает 7–8 км. На этом участке шельфа в наиболее мелководной зоне (до 10–25 м) располагаются выходы мергелевых скал, прерывающиеся в районах впадения устьев рек рыхлыми осадками [1, 11]. Бровка шельфа располагается здесь на глубинах от 60–70 м в районе Голубой бухты до 130 м в районе п-ова Абрау [5, 38]. Большинство рек в этой части шельфа не имеют естественных отстойников и несут воды непосредственно в море. Прибрежные районы здесь находятся под влиянием Основного Черноморского Течения (ОЧТ), направленного с юго-востока на северо-запад, и его производных – прибрежных антициклонических вихрей [10]. В районе м. Идокопас происходит отрыв ОЧТ от берега, а между ним и берегом образуется антициклонический вихрь [10]. Таким образом, районы севернее и южнее этого мыса оказываются в принципиально разных гидрологических условиях: зоне струйного ОЧТ на юге и периодически возникающих и исчезающих антициклонических вихрей и отхода ОЧТ на севере от него [10]. Севернее Анапы располагается относительно широкий шельф (до 30–50 км шириной). Этот район отличается отсутствием постоянных наземных водотоков. Здесь присутствует обширное песчаное аккумулятивное тело – Анапская пересыпь [19, 20]. В этом районе из-за значительной ширины шельфа ОЧТ, проходящее над континентальным склоном, отходит от берега [6]. Донные осадки в исследованном районе до глубин 15–20 м сложены песками разной крупности, а глубже располагается зона аккумуляции алевроитового и алевропелитового материала [1]. Глубины 25–70 м – зоны обширных ракушечников разного происхождения [11, 38]. В склоновой области доля ракушечного материала резко падает [38].

Отбор проб. Для оценки ежегодной поставки карбонатного углерода моллюсками рыхлых грунтов были использованы материалы Базы данных Лаборатории экологии прибрежных

донных сообществ Института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН за 2008–2023 гг. по биомассе макрозообентоса (всего 230 станций по 3–4 пробы на станцию). Пробы собраны на глубинах 10–70 м в пяти районах черноморского побережья Краснодарского края (заповедник Утриш, г. Геленджик, бух. Инал, пос. Дивноморское, пос. Шепси), а также на глубинах 80–200 м в двух районах: заповедник Утриш и близ г. Геленджик, с помощью дночерпателя Океан-0.1 (рис. 1). На шельфе (глубины 10–70 м) пробы бентоса отбирали в трех повторностях на станцию. На крутых участках материкового склона (глубины 80–200 м) из-за сильного наклона дна отбирали по одному дночерпателю на станцию [38]. Промывку проб бентоса для всех регионов вели через сито с диаметром ячеек 0.5 мм, материал фиксировали формалином, разведенным морской водой до концентрации формальдегида 4%.

Обработка проб макрозообентоса и анализ данных. В пробах определяли видовой состав и биомассу макрозообентоса. Рассчитывали суммарную биомассу на станцию (B , г/м²). Для идентификации использовали ключи определителя фауны Черного моря [23], а также списки чужеродных видов бентоса [31]. Проверку валидности видовых названий (на октябрь 2024 г.) осуществляли согласно международной базе данных WoRMS [52].

Оценка поставки карбонатного углерода моллюсками. Оценка проводили на основании разработанной авторами модели [32]: проводили

оценку биомасс моллюсков в каждой точке, а затем расчет возможной поставки карбонатного углерода отдельными видами (г·м⁻²·год⁻¹) на основании данных об их биомассе, содержании карбонатного углерода в их раковинах и известной наибольшей продолжительности жизни, а затем суммировали полученные расчетные величины поставки на станцию. Расчет проводили на основании трех сценариев [32]: 1) особи вида проживают наибольшую продолжительность жизни; 2) особи вида проживают половину наибольшей продолжительности жизни; 3) особи вида гибнут одномоментно за один год. Продолжительность жизни видов определялась на основании литературных данных. Погрешность определения поставки карбонатного углерода в донные осадки моллюсками на основании модели относительно реальных данных по динамике сообществ не превышало 26% [32]. Содержание раковинного материала в общем весе моллюсков определяли на основании литературных данных и собственных измерений (табл. 1 по [32] с дополнениями).

Для площадных расчетов поставки карбонатного углерода (т/год) моллюсками были использованы контуры донных биоценозов, выделенных при участии авторов настоящего исследования и приведенных в Экологическом Атласе [16] и уточненных в работе [38] для биоценозов зоны гипоксии. Расчет проводили, усредняя точечные данные по поставке $S_{\text{карб}}$ на площадь дна в пределах сообщества. Границы районов определяли на основании различий структу-

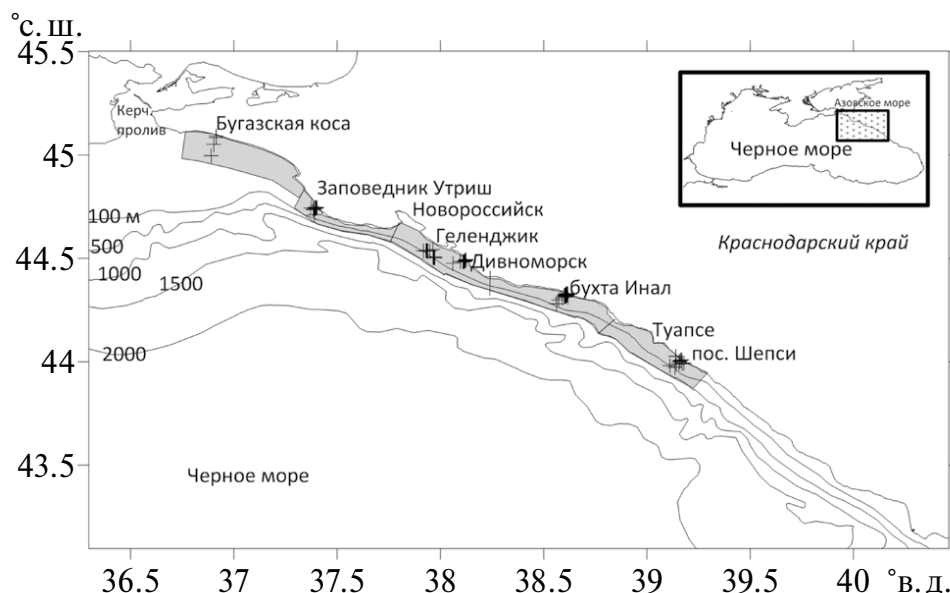


Рис. 1. Карта-схема точек отбора проб. Полигоны для площадных оценок обозначены серой заливкой.

Таблица 1. Продолжительность жизни, содержание раковинного материала в сырой биомассе, содержание карбонатного углерода и оценка поставки карбонатного материала в донные осадки на 100 г массы моллюсков в год для разных видов Азово-Черноморского региона при разных сценариях смертности

Номер сценария				I			II			III			Лит. ист.
Вид	N, лет	W _{карб/общ} , %	C _{карб} , %	M, г	M _{карб} , г	C _{карб} , %	M, г	M _{карб} , г	C _{карб} , %	M, г	M _{карб} , г	C _{карб} , %	
Bivalvia													
<i>Abra alba</i>	2	37	11.3	50	19	2.1	100	37	4.2	100	37	4.2	[41]
<i>Anadara kagoshimensis</i>	14	65	11.4	7	5	0.5	14	9	1.1	100	65	7.4	[18]
<i>Chamelea gallina</i>	14	81*	11.4	7	6	0.7	14	12	1.3	100	81	9.2	
<i>Donax semistriatus</i>	9	79	11.5	11	9	1.0	22	18	2.0	100	79	9.1	[2]
<i>Gouldia minima</i>	3	61	10.1	33	20	2.1	67	41	4.1	100	61	6.2	[35]
<i>Lucinella divaricata</i>	3	69	11.6	33	23	2.7	67	46	5.3	100	69	8.0	[8]
<i>Modiolula phaseolina</i>	2	61	11.7	50	31	3.6	100	61	7.1	100	61	7.1	[49]
<i>Mytilaster lineatus</i>	19	37	10.9	5	2	0.2	11	4	0.4	100	37	4.0	[8]
<i>Mytilus galloprovincialis</i>	4	65	11.3	25	16	1.8	50	33	3.7	100	67	7.3	[27]
<i>Parvicardium exiguum</i>	8	61	11.3	13	8	0.9	25	15	1.7	100	61	6.9	[8]
<i>Parvicardium simile</i>	1	83	10.8	100	83	9.0	100	83	17.9	100	67	9.0	[41]
<i>Pitar rudis</i>	1	48	11	100	48	5.2	100	48	5.2	100	48	5.2	[41]
<i>Spisula subtruncata</i>	4	68	11.3	25	17	1.9	50	34	3.8	100	68	7.7	[15]
	3	75	11.3	33	25	2.8	67	50	5.7	100	73	8.5	[36]
Gastropoda													
<i>Rapana venosa</i>	14	67	11.7	7	5	0.6	14	10	1.1	100	67	7.8	[30, 48]
<i>Tritia reticulata</i>	6	60	11.3	17	10	1.1	33	20	2.3	100	60	6.8	[4]

Примечание: N — продолжительность жизни (лет), $W_{\text{карб/общ}}$ — доля массы раковины от индивидуальной биомассы взрослых, M — элиминированная биомасса, $M_{\text{карб}}$ — поставка карбоната от умерших моллюсков, * — моллюски с глубины 40 м.

ры донных осадков, геоморфологических и гидрографических границ. Так, границу между сообществами района Керченско-Таманского шельфа и п-ова Абрау проводили по северной границе полуострова, где к северу шельф становится более пологим. Сходным образом выделена граница между полигоном п-ова Абрау и районом г. Новороссийска, г. Геленджика и пос. Дивноморское. Район п-ова Абрау характеризуется чрезвычайно большими углами наклона дна и подводными мысами. А более южная область — наиболее узким шельфом и мелководным расположением его бровки. Его южная граница проведена по м. Идокопас на основании принципиально отличающихся севернее и южнее его гидрологических режимов [10]. Границу между

полигоном бухты Инал и пос. Шепси проводили по пос. Ольгинка, расположенном на мысу, равноудаленном от обоих разрезов. В таблицах и на рисунках районы обозначали краткими названиями (район Бугазской косы — *Бугаз*; район заповедника Утриш и открытая акватория п-ова Абрау — *Утриш*; район Голубой (Рыбачьей) бухты, г. Геленджик и пос. Дивноморское — *Геленджик*; район бух. Инал — *Инал*; район пос. Шепси — *Шепси*). Расчет площади дна проводили в программе Surfer 16.3.408 (64-bit) Golden Software, LLC и QGIS 3.14.0-Pi Free Software Foundation, Inc. Значения площадей (км^2) приведены в табл. 2. Общая площадь для Черного моря составляла 1707 км^2 . Данные приведены в виде средних значений со стандартными отклонениями.

Таблица 2. Площадь дна выделенных полигонов (км²), для которых выполнена оценка поставки карбонатного углерода

Район	Зоны глубин, м					
	10–20	20–30	30–50	50–80	80–125	125–160
Сообщества [16, 38]	<i>Ch. gallina</i> – <i>D. semistriatus</i> – <i>L. divaricata</i>	<i>Ch. gallina</i> – <i>G. minima</i> – <i>P. rudis</i>	<i>P. simile</i>	<i>M. phaseolina</i>	<i>M. palmata</i>	Nematoda-Oligochaeta
Бугаз	124 (10–17 м)	250 (17–25 м)	–	–	–	–
Утриш	–	16.5	79.5	206	56	25
Геленджик	42	34	127	76	24	12
Инал	44	65	116	73	–	–
Шепси	54	48	92	143	–	–
Суммарно	264	413.5	414.5	498	80	37

Примечание. В районе “Бугаз” в скобках указан диапазон глубин, использованный для подсчета площади.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственное распределение поставки карбонатного углерода на открытом шельфе и склоне северо-востока Черного моря. Максимальные биомассы макрозообентоса (до 859 г/м²) были зафиксированы в прибрежной зоне (10–15 м) бухты Инал в 2020 г. за счет двустворчатого моллюска *Chamelea gallina* (Linnaeus, 1758). На

глубине 60 м наблюдался еще один максимум (до 828 г/м² в пос. Шепси) за счет *Modiolula phaseolina* (R. A. Philippi, 1844). Глубже 80 м значения биомассы падали до 0.1 г/м² и менее. Вклад моллюсков в сообщества кромки шельфа и склона был чрезвычайно низким, взрослых особей отмечено не было.

Наибольшее количество карбонатного углерода поставляли моллюски прибрежной зоны (10–

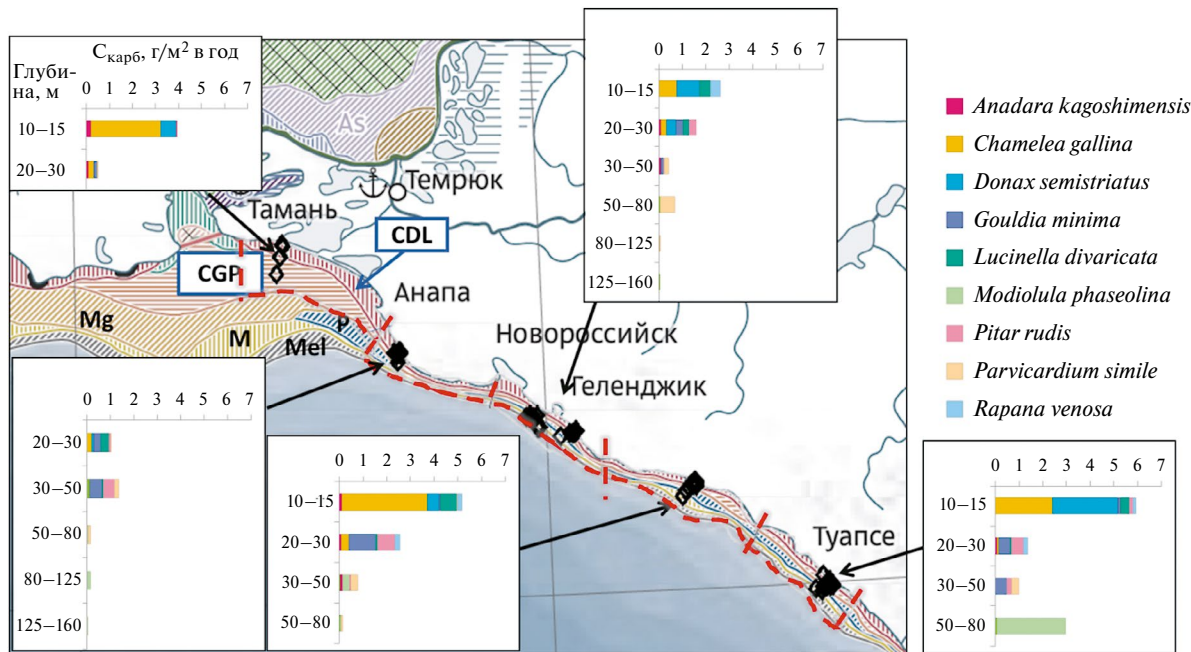


Рис. 2. Расчетные массы поставки карбонатного углерода разными видами моллюсков на полигонах в 2008–2023 гг., вычисленные на основании сценария 2 (вкладки), наложенные на карту-схему распределения макрозообентосных сообществ, приведенную в Экологическом атласе [16]. CDL – биоценоз *Chamelea gallina* – *Donax semistriatus* – *Lucinella divaricata*, CGP – *Ch. gallina* – *Gouldia minima* – *Pitar rudis*, Mg – *Mytilus galloprovincialis*, M – *Modiolula phaseolina*, Mel – обедненный глубоководный биоценоз с доминированием полихет *Melinna* aff. *palmata*.

40 м) — в среднем до 20 г/м² в год (рис. 2). Второй локальный максимум был отмечен на глубине 70 м и лишь в зоне массового развития *M. phaseolina* (фазеолинового ила) в районе пос. Шепси.

Согласно оценкам, выполненным на основании разных сценариев [32], в прибрежную зону (10–20 м глубины) в 2008–2022 гг. было поставлено неорганического углерода от 1.36 до 20.00 г·м⁻²·год⁻¹ (табл. 3). В этой зоне основной вклад в поставку был обеспечен двумя короткоживущими видами *Bivalvia*: *Donax semistriatus* Poli (1795) и *Lucinella divaricata* (Linnaeus, 1758), и одним долгоживущим — *Ch. gallina* (см. рис. 2). Поставка $S_{\text{карб}}$ на глубинах 20–30 м была меньше, ее обеспечивали короткоживущие двустворчатые моллюски *L. divaricata* и *Gouldia minima* (Montagu, 1803). На 30–50 м глубинах значения поставки карбонатов падали на порядок по сравнению с более мелководной зоной, здесь основным поставщиком $S_{\text{карб}}$ был короткоживущий вид *Parvicardium simile* (Milaschewitsch, 1909). В зоне фазеолинового ила (50–80 м), где были выявлены

высокие значения биомасс моллюсков, достижение уровня поставки, сравнимого с прибрежной зоной, возможно лишь при сценарии, подразумевающим “одномоментную” (за год) гибель моллюсков из-за доминирования там долгоживущего вида *M. phaseolina*. Глубже 80 м масса поставляемого моллюсками $S_{\text{карб}}$ не превышала 1 г·м⁻²·год⁻¹, а на глубинах 125–160 м — 0.01 г·м⁻²·год⁻¹. Здесь поставку обеспечивали *M. phaseolina* и *Abra alba* (W. Wood, 1802), однако взрослых особей указанных видов здесь отмечено не было.

Одни и те же глубины в разных районах шельфа отличались по уровню поставки карбонатного углерода в донные осадки (см. рис. 2). Так, в районе Бугазской косы и бух. Инал основную роль в поставке $S_{\text{карб}}$ на глубине 10–15 м играла *Ch. gallina*, а в пос. Дивноморское и бух. Инал — *D. semistriatus*. *Lucinella divaricata* вносила существенный вклад лишь в пос. Дивноморское и бух. Инал. На глубинах 20–30 м комплекс видов, обеспечивающих поставку карбонатов, был уникален для каждого из рассмотренных районов:

Таблица 3. Усредненная суммарная поставка карбонатного углерода моллюсками ($\pm$ станд. отклон.) (г·м⁻²·год⁻¹) на полигонах в 2008–2023 гг., вычисленная на основании разных сценариев

Район	Номер сценария	Диапазон глубин, м					
		10–20	20–30	30–50	50–80	80–125	125–160
Сообщество [16, 38]		<i>Ch. gallina</i> – <i>D. semistriatus</i> – <i>L. divaricata</i>	<i>Ch. gallina</i> – <i>G. minima</i> – <i>P. rudis</i>	<i>P. simile</i>	<i>M. phaseolina</i>	<i>M. palmata</i>	Nematoda – Oligochaeta
Бугаз	1	2.00 ± 0.38	0.25 ± 0.05				
	2	3.99 ± 0.76	0.48 ± 0.09	—	—	—	—
	3	16.28 ± 7.02	1.90 ± 0.46				
Утриш	1		0.54 ± 0.44	0.89 ± 0.78	0.11 ± 0.08	0.07 ± 0.04	0.0002
	2	—	1.08 ± 0.88	1.54 ± 1.60	0.13 ± 0.09	0.14 ± 0.10	0.0003
	3		2.13 ± 1.68	2.52 ± 2.80	0.35 ± 0.38	1.11 ± 1.11	0.0028
Геленджик	1	1.36 ± 0.91	0.85 ± 0.78	0.29 ± 0.16	0.65 ± 0.68	0.01 ± 0.03	0.00001 ± ± 0.00004
	2	2.7 ± 1.81	1.7 ± 1.56	0.41 ± 0.19	0.67 ± 0.70	0.02 ± 0.04	0.00001 ± ± 0.00005
	3	8.67 ± 7.85	3.67 ± 3.81	1.03 ± 0.58	0.75 ± 0.82	0.02 ± 0.05	0.00002 ± ± 0.00008
Инал	1	2.62 ± 2.30	1.34 ± 1.73	0.55 ± 0.16	0.13		
	2	5.23 ± 4.59	2.66 ± 3.46	0.80 ± 0.06	0.16	—	—
	3	20.00 ± 19.31	6.95 ± 7.99	3.93 ± 2.75	0.41		
Шепси	1	3.02 ± 1.97	0.73 ± 0.69	0.63 ± 0.12	1.50 ± 0.47		
	2	6.04 ± 3.95	1.45 ± 1.39	0.99 ± 0.62	2.97 ± 0.9	—	—
	3	16.91 ± 17.25	4.10 ± 3.04	1.47 ± 1.28	27.64 ± 7.85		

в Бугазе преобладали *G. minima* и *Ch. gallina*, в бух. Инал и пос. Шепси — *G. minima* и *Pitar rudis* (Poli, 1795), а в пос. Дивноморское и заповеднике Утриш — *L. divaricata*, *G. minima*, *D. semistriatus* и *P. rudis*. С глубины 40–50 м ведущий комплекс видов и источник поставки карбонатного углерода сменялся на *P. simile* и *G. minima*, причем в районе заповедника Утриш смена происходила на 50 м. На 50–80 м основным поставщиком карбонатного углерода из бентосного источника в районе заповедника Утриш, г. Геленджик и бух. Инал был короткоживущий двустворчатый моллюск *P. simile*. В районе пос. Шепси на этих глубинах было найдено множество живых *M. phaseolina* с рекордными для этих глубин в современный период биомассами и поставки $S_{\text{карб}}$. Этот же вид обеспечивал значениями поставки $S_{\text{карб}}$ в донные осадки в районе заповедника Утриш до глубин 135 м, в отличие от Геленджика, где на тех же глубинах ее обеспечивали в основном короткоживущие *A. alba*.

Кроме пространственного фактора, на поставку $S_{\text{карб}}$ моллюсками в донные осадки оказывал влияние и временной. Так, в 2008–2022 гг. в бух.

Инал колебания массы поставки $S_{\text{карб}}$ моллюсками достигали двух порядков величин (рис. 3).

Наиболее высокие значения были отмечены в 2019–2021 гг. На 10–15 м по биомассе доминировали двустворчатые моллюски — долгоживущий вид *Ch. gallina* и короткоживущие *L. divaricata* и *D. semistriatus*. Вклад последних двух видов в поставку $S_{\text{карб}}$ возрастал в годы минимальных биомасс макрозообентоса и, соответственно, минимальных поставок. На глубинах 20–30 м поставку обеспечивали два вида: *G. minima* и *P. rudis*. До 2015 г. включительно был высок вклад хищного брюхоногого моллюска *R. venosa*.

Площадные оценки поставки раковинного материала и карбонатного углерода. Впервые для северо-восточного побережья Черного моря были приблизительно рассчитаны массы поставляемого моллюсками рыхлых грунтов карбонатного углерода (табл. 4). Поставка карбонатного углерода моллюсками для изученного 230 км участка открытого побережья (без учета глубин более 25 м на Керченско-Таманском шельфе) на площади 1707 км² суммарно может достигать от 3381 т/год

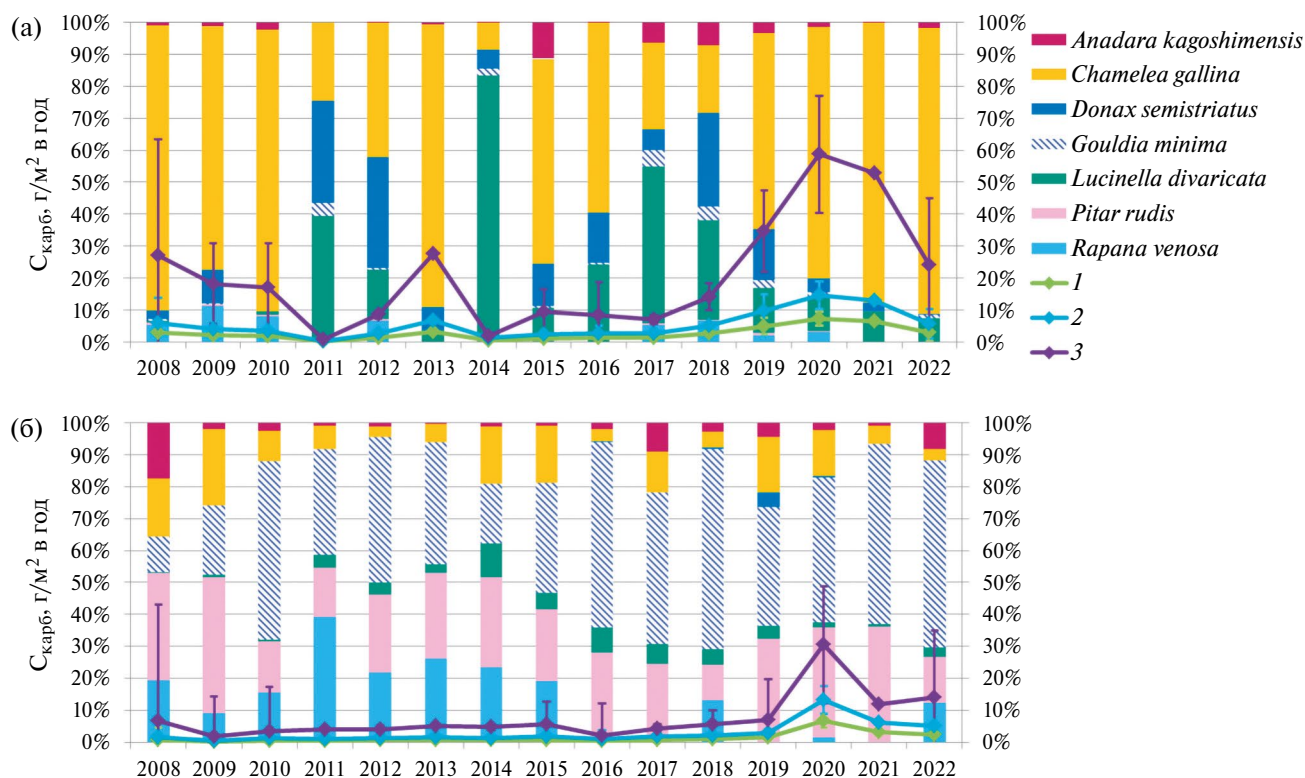


Рис. 3. Усредненная суммарная поставка карбонатного углерода моллюсками ($\pm$ станд. отклон.) ($\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) в бух. Инал на глубинах 10–15 м (а) и 2–30 м (б) в 2008–2022 гг., вычисленная на основании разных сценариев (1 — сценарий 1, 2 — сценарий 2, 3 — сценарий 3).

Таблица 4. Усредненная поставка карбонатного углерода моллюсками на полигонах (т/год)

Район	Номер сценария	Диапазон глубин, м						
		10–20 (10–17*)	20–30 (17–25*)	30–50	50–80	80–125	125–160	
Сообщество [16, 38]		<i>Ch. gallina</i> – <i>D. semistriatus</i> – <i>L. divaricata</i>	<i>Ch. gallina</i> – <i>G. minima</i> – <i>P. rudis</i>	<i>P. simile</i>	<i>M. phaseolina</i>	<i>M. phaseolina</i> – Polychaeta	Nematoda– Oligochaeta	Суммарно
Бугаз	1	248 ± 47	63 ± 13					311
	2	495 ± 94	120 ± 23	—	—	—	—	615
	3	2019 ± 870	475 ± 115					2494
Утриш	1		9 ± 7	71 ± 62	23 ± 16	4 ± 2	0.005 ± 0.005	106
	2	—	18 ± 15	122 ± 127	27 ± 19	8 ± 6	0.0075 ± ± 0.0075	175
	3		35 ± 28	200 ± 223	72 ± 78	62 ± 62	0.07 ± 0.07	370
Геленджик	1	57 ± 38	29 ± 27	37 ± 20	49 ± 52	0.2 ± 0.7	0.0001 ± ± 0.0005	172
	2	113 ± 76	58 ± 53	52 ± 24	51 ± 53	0.5 ± 1	0.0001 ± ± 0.0006	275
	3	364 ± 330	125 ± 130	131 ± 74	57 ± 62	0.5 ± 1.2	0.0002 ± ± 0.001	677
Инал	1	115 ± 101	87 ± 112	64 ± 19	9 ± 9			276
	2	230 ± 202	173 ± 225	93 ± 7	12 ± 12	—	—	508
	3	880 ± 850	452 ± 519	456 ± 319	30 ± 30			1818
Шепси	1	163 ± 106	35 ± 33	58 ± 11	215 ± 67			471
	2	326 ± 213	70 ± 67	91 ± 57	425 ± 129	—	—	912
	3	913 ± 932	197 ± 146	135 ± 118	3953 ± 1123			5198
Всего	1	604 ± 297	231 ± 206	229 ± 137	2312 ± 145	4.2 ± 3	0.3934 ± ± 0.782	3381
	2	1201 ± 591	449 ± 407	358 ± 235	2530 ± 212	8.3 ± 6.6	0.4069 ± ± 0.8067	4548
	3	4356 ± 3001	1323 ± 1074	922 ± 743	6128 ± 1293	62.6 ± 63.4	0.9996 ± ± 1.9297	12 793

* Диапазон глубин, использованный для подсчета площади в районе Бугазской косы.

(расчет на основании сценария 1) до 12 793 т/год (сценарий 3).

ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее эффективные районы и глубины образования Скарб моллюсками в северо-восточном секторе Черного моря. На северо-восточном шельфе и склоне Черного моря было выделено две зоны рыхлых грунтов, контрастных по скорости поставки моллюсками карбонатного углерода: с доминированием моллюсков и практически без них. Первая занимала глубины от 7–10 м (по на-

шим данным) и от 3 м в районе Анапской пере-сыпи (по [19]) и до бровки шельфа (60–130 м в зависимости от района и рельефа дна) (наст. исслед., [7, 26]). Глубже, в среднем от 80 м и до границы оксидной зоны (около 160 м [38]) на материковом склоне, доминировали другие группы донных макроскопических беспозвоночных, не синтезирующих карбонаты [38].

Наибольшей поставкой моллюсками карбонатного углерода отличались глубины 10–15 и 50–80 м, соответствующие сообществам *Chamelea gallina* – *Donax semistriatus* – *Lucinella divaricata* и *Modiolula phaseolina* [16]. Это связано

с образованием двустворчатыми моллюсками *Ch. gallina* и *M. phaseolina* высокоплотных поселений в этих районах. Основными факторами, обеспечивающими образование таких скоплений в этих диапазонах глубин, является гранулометрический состав донных осадков и специфический температурный режим в каждой из зон [17]. Так, низкое содержание илистых фракций в прибрежной зоне открытого побережья и высокие летние температуры позволяют теплолюбивому псаммофильному виду *Ch. gallina* занимать пояс глубин от 7 до 15 м и образовывать в нем высокоплотные скопления [17]. В районе заповедника Утриш (п-ов Абрау) сообщества этого вида опускаются на большие глубины (до 30 м) вместе с поясом слабозаиленных песков [39]. Это связано с большими уклонами дна и меньшим уровнем речного стока на этом участке побережья по сравнению с более южными районами [17, 39]. Основным фактором формирования скопления *M. phaseolina* является температурный режим [17], поскольку этот вид по происхождению является северо-атлантическим и предпочитает температуры не более 9°C [8]. В Черном море такие температуры на протяжении всего года свойственны глубинам 50 м и более. А нижнюю границу высокоплотных скоплений этого вида определяет кислородный режим [38]. Таким образом, зона наи-

большого обилия *M. phaseolina* и, соответственно, наибольших расчетных поставок этим видом $S_{\text{карб}}$ в донные осадки — глубины 60–70 м.

Наименьшими значениями поставки $S_{\text{карб}}$ моллюсками на шельфе отличались глубины 30–50 м, где еще в XX в. располагались высокопродуктивные мидиевые илы и устричные банки [14]. В XXI в. мидиевые илы на северо-восточном побережье Черного моря встречались лишь в отдельных районах — близ Керченского пролива и г. Адлер [29], а устричные банки прекратили свое существование [24]. В исследованных районах мидиевые илы отмечены не были. Двустворчатый моллюск *Mytilus galloprovincialis* в пробах был отмечен лишь в виде единичных ювенильных экземпляров. Таким образом, сниженный по сравнению с более и менее глубокими горизонтами уровень поставки $S_{\text{карб}}$ моллюсками в донные осадки связан здесь с отсутствием в последние 20–25 лет пояса мидиевого ила.

Обращает на себя внимание пространственная неоднородность поставки $S_{\text{карб}}$ моллюсками одного биоценоза в разных районах (см. рис. 2, табл. 5). В большинстве районов наибольший уровень поставки был приурочен к глубинам 10–15 м. Однако состав видов, поставляющих $S_{\text{карб}}$ в донные осадки, различался: для Геленджикского района и района Шепси роль короткожи-

Таблица 5. Поставка карбонатного углерода разными видами двустворчатых моллюсков морей умеренного пояса

Вид	Район	Площадь района, км ²	Поставка $S_{\text{карб}}$, г/м ² в год	Суммарная поставка на площадь дна, тыс. т	Лит. ист.
<i>Cerastoderma edule</i>	Прибрежные области Северного моря	1 300	6–18	7.8–23.4	[34]
<i>Macoma balthica</i>			1.6–2.6	2.4	[33]
<i>Magallana gigas</i>	Бискайский залив	—	16.1	—	[43]
<i>Arcuatula senhousia</i>	Лагуна, Адриатическое море	11.5	46.04	0.5 ¹	[45]
<i>Ruditapes philippinarum</i> ²	Лагуна, Адриатическое море	11.5	98	1.1 ¹	[44]
<i>Mytilus galloprovincialis</i> ²	Залив, Адриатическое море	32	1 600	51.2	[46]
<i>Cerastoderma glaucum</i>	Азовское море	39 000	30	1 800	[13]
<i>Chamelea gallina</i>	Черное море	281 ³	0.04–14.9	0.011–4.2	Наст. иссл. сценарий 2
<i>Donax semistriatus</i>		281 ³	0.02–6.3	0.006–1.8	
<i>Gouldia minima</i>		397 ⁴	0.006–6.8	0.002–2.7	
<i>Pitar rudis</i>		397 ⁴	0.001–7.3	0.0002–2.9	
<i>Modiolula phaseolina</i>		143 ⁵	2.3–3.4	0.3–0.5	

Примечания. ¹ — расчет не приведен в исходной работе и выполнен авторами настоящего исследования; ² — объект марикультуры; ³ — площадь рассчитана для глубин 10–15 м всех районов и 20–30 м для заповедника Утриш; ⁴ — площадь рассчитана для глубин 20–30 м всех районов, кроме заповедника Утриш; ⁵ — использована площадь только района Шепси.

вущего *D. semistriatus* была выше роли основного доминанта сообществ — *Ch. gallina*, а для района Бугаза и бух. Инал абсолютным доминантом поставки была *Ch. gallina*. Такая пространственная неоднородность сообществ одного пояса является характерной чертой сообществ прибрежной зоны, где состав донных осадков и гидрологические условия наиболее динамичны [17]. Для глубин 50–80 м характерна другая картина — сообщества в разных районах располагались на разных глубинах: зона фазеолинового ила в пос. Шепси располагалась на глубине 60–70 м, тогда как в районе Голубой бухты — на 50 м (см. рис. 2). Обилие основного доминанта биоценоза *M. phaseolina* существенно различалось, достигая абсолютного максимума в районе пос. Шепси. Возможно, это связано с разной глубиной залегания бровки шельфа (около 60 м в районе Голубой бухты и около 100 м в районе пос. Шепси), разделяющей зоны с разными условиями осадконакопления. Поскольку условия осадконакопления являются ключевыми для донных биоценозов, определяющими состав и обилие сообществ, этот фактор представляется основным для объяснения мозаичности распределения сообществ глубин 50–120 м [3]. В свою очередь, состав сообществ определяет и уровень поставки $C_{\text{карб}}$ в донные осадки моллюсками.

Другим объяснением различий в уровне поставки карбонатного углерода моллюсками в пределах одного биоценоза является временной фактор. Шельф Черного моря — чрезвычайно динамичная система, изменения в которой происходят непрерывно и постоянно. И самые существенные перестройки наблюдаются в наиболее продуктивной по карбонатам прибрежной зоне глубин (см. рис. 3). Здесь из-за колебаний биомассы основного доминанта *Ch. gallina* в 2008–2022 гг. уровень поставки $C_{\text{карб}}$ в донные осадки в разные годы отличался на порядки. При этом в годы наименьших поставок этим крупноразмерным и долгоживущим видом лидирующие позиции занимали мелкоразмерные короткоживущие *L. divaricata*, имеющие существенно меньший межгодовой размах поставки $C_{\text{карб}}$. Таким образом, в Черном море колебания поставки носят регулярный и возможно даже циклический характер [15] и связаны с соотношением в таксоценозе Mollusca долгоживущих и короткоживущих доминантов.

Оценка поставки карбонатного углерода моллюсками северо-восточного шельфа в масштабах Азово-Черноморского региона. Исследованный

в настоящей работе участок составляет около 1.6% площади всего шельфа Черного моря. Однако закономерности, выявленные здесь, могут быть распространены и на другие районы этого водоема, поскольку описанные здесь биоценозы являются обычными для черноморского шельфа [11, 14, 16, 38]. Как и в других участках шельфа, здесь в самой прибрежной части расположено сообщество *Ch. gallina* — *D. semistriatus* — *L. divaricata*, сменяющееся на глубине около 20–30 м сообществом *Ch. gallina* — *G. minima* — *P. rudis*. На глубинах 50–70 м располагается фазеолиновый ил, а глубже — обедненный биоценоз кромки шельфа и склона. Основным отличием современных донных биоценозов северо-восточного участка от других районов шельфа Черного моря является практически полное отсутствие здесь пояса мидиевого ила с высокими биомассами моллюсков. Именно эта зона считалась наиболее продуктивной [14] и являлась основным источником биогенного карбоната в XX в. [28]. Основные площади мидиевых илов в настоящее время сосредоточены в зоне Прикерченского мелководья и северо-западной части Черного моря, где биомасса *M. galloprovincialis* в 2010–2013 гг. достигала 220–250 г/м² [47, 51]. По нашим расчетам на основании приведенных выше значений, это сообщество только за счет мидий может поставлять в донные осадки от 3.8–4.3 г·м⁻² $C_{\text{карб}}$ в год (сценарий 2) до 15.8–7.3 г·м⁻² $C_{\text{карб}}$ в год (сценарий 3). Такие массы поставляемого $C_{\text{карб}}$ превышают показатели для сходного диапазона глубин 30–50 м на северо-восточном шельфе в полтора раза (см. табл. 3).

Площадные оценки поставки карбонатного углерода моллюсками. Площадные оценки, выполненные в настоящей работе, являются приблизительными. Возможные неточности наших оценок масс поставки карбонатного углерода моллюсками в осадки связаны прежде всего с неточностью определения границ сообществ в Экологическом атласе [16], на основании которого делались площадные оценки. Вторым источником погрешности является предлагаемый в работе подход, основанный на предположении о проживании моллюсками определенной продолжительности от максимально возможного срока их жизни. Ошибка, возникающая при этом, не превышает 26% [32]. Кроме того, погрешность в оценку поставки карбонатов в донные осадки могут вносить неточные знания продолжительности жизни некоторых наиболее мелкоразмерных и малоисследованных видов (*Gouldia*

minima, *Lucinella divaricata*, *Pitar rudis*), их реальной средней продолжительности жизни и среднего уровня смертности отдельных возрастных групп. И наконец, пространственная неоднородность сообществ является одним из главных источников ошибок. Рассчитывая массы поставляемого карбонатного углерода на площадь по точечным съемкам, мы делаем предположение, что распределение сообществ равномерно по площади. Проверка гипотезы о равномерности распределения сообществ в пределах разных масштабов пространства требует подробнейших съемок, что является чрезвычайно сложной и трудозатратной задачей, не решенной до сих пор для изучаемого участка побережья. В связи с вышеизложенным, подход, предполагающий обобщения и усреднения на площадь результатов точечных съемок, на сегодняшний день является единственно возможным подходом для проведения площадных оценок поставок биогенного карбоната донными сообществами Черного моря. Чтобы проверить сходимость наших оценок с оценками, выполненными на основании других методов, мы выполнили расчет суммарного объема карбонатного углерода, теоретически поставляемого моллюсками на всем шельфе Черного моря. Если принять за среднее значения для северо-восточного шельфа (по сценарию 2, наст. иссл.) $2 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, а площадь шельфа всего моря за 112 тыс. км² [12], то общий объем поставляемого моллюсками карбонатного углерода составит 224 тыс. т в год. Литературные оценки общей ежегодной продукции зообентоса Черного моря составляют около 15 млн т возд. сух. биомассы [9]. Если принять допущения этой работы, что вклад доминирующих видов составляет 60–95% и основными доминантами являются двустворчатые моллюски, причем наибольшая роль у мидии, то можно приблизительно рассчитать ежегодную поставку карбонатного углерода. Она составит, согласно сценарию 2, около 255 тыс. т в год. По порядку величин результаты оказываются сходным с нашими оценками, а отличия составляют 17%.

Насколько эти величины сравнимы с показателями, вычисленными для других шельфовых районов Мирового океана?

В окраинных морях умеренного пояса интенсивность поставки биогенного $S_{\text{карб}}$ двустворчатыми моллюсками *Cerastoderma edule* (L., 1758), *Magallana gigas* (Thunberg, 1793) и *Macoma balthica* (L., 1758) [33, 34, 43] в донные осадки были сход-

ны с нашими оценками для разных видов шельфа Черного моря (см. табл. 5). Почти на порядок выше была поставка карбонатного углерода дикими видами моллюсков средиземноморских лагун (*Arcuatula senhousia* (Benson, 1842) [45]. И наиболее высокие поставки давали виды, искусственно выращиваемые в условиях марикультуры (*Ruditapes philippinarum* Adams & Reeve, 1850 и *Mytilus galloprovincialis*).

В наиболее продуктивном российском морском водоеме — Азовском море, годовая продукция моллюсков (преимущественно за счет *Cerastoderma glaucum*) (Bruguère, 1789) на площади 39 тыс. км² на 2005 г. достигала 32.8 млн т, а суммарная поставка ими карбонатного углерода в море — около 1.8 млн т [13]. Эти значения вполне сопоставимы с продукцией искусственно разводимых видов в средиземноморских лагунах (*R. philippinarum*) [44] и на порядок превышают поставку биогенного карбоната моллюсками на всем черноморском шельфе, который больше Азова по площади в 2.7 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На северо-восточном шельфе Черного моря было выделено две контрастных по стратегии аккумуляции углерода зоны: с доминированием моллюсков (глубины 0–80 м) и с доминированием организмов, не обладающих кальцинированным скелетом и не обеспечивающих поставку неорганического углерода в осадки (80–160 м). В прибрежной зоне выделено две подзоны наиболее эффективного образования биогенного карбоната моллюсками рыхлых грунтов: прибрежная (глубины 10–15 м) и более глубоководная — нижняя зона шельфа (50–80 м). Настоящие результаты расчета поставки карбонатного материала моллюсками являются чрезвычайно приблизительными, поскольку очень сильно зависят от времени и района. Наибольшие колебания величин поставки отмечаются в наиболее продуктивной по карбонатам зоне: глубины от 10 до 30 м. Поставка карбоната из бентосного источника на северо-восточном шельфе Черного моря превышает поставку из планктонного источника.

Благодарности. Авторы чрезвычайно признательны всем коллегам, принимавшим участие в организации и непосредственно в отборе проб 2008–2023 гг.: С.Б. Куклеву, А.Г. Зацепину, У.В. Симаковой, А.Б. Басину, М.И. Симакову, В.А. Тимофееву, В.Л. Семину, А.А. Веденину, В.Н. Кокареву, В.А. Свасян, экипажу МНИС

“Ашамба”, Т.А. Алексеевой за выполнение анализов гранулометрического состава донных осадков, а также В.О. Мокиевскому и Д.В. Кондарь за плодотворное обсуждение результатов работы.

Источники финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00181, <https://rscf.ru/project/23-27-00181/>.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А., Говберг М.И., Новиков З.Т. и др. Геоморфологические и литологические особенности строения шельфа северо-восточной части Черного моря в связи с исследованием процессов современного осадконакопления // Континентальные и островные шельфы. М.: Наука, 1981. С. 108–137.
2. Болтачева Н.А., Мазлумян С.А. Линейный рост и продолжительность жизни моллюска *Chamelea gallina* (Bivalvia: Veneridae) в Черном море // Экология моря. 2001. Т. 55. С. 50–52.
3. Бондарев И.П., Ломакин И.Э. Переходная зона между шельфом и континентальным склоном северной части Черного моря: ландшафтный подход // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2010. № 3. С. 57–64.
4. Виноградова З.А. Материалы по биологии моллюсков Черного моря // Тр. Карадаг. биол. ст. 1950. Вып. 9. С. 100–159.
5. Дмитриевский Н.Н., Ананьев Р.А., Колочкина Г.А. и др. Современное картографирование рельефа морского дна на примере северо-восточной части Черного моря // Океанология. 2022. Т. 62. № 2. С. 309–314.
6. Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В. и др. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрифтерным данным // Океанология. 2004. Т. 44. № 1. С. 34–48.
7. Загорская А.С. Макрозообентос рыхлых грунтов северо-восточной части Черного моря (Джубга–Кудепста) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2014. Т. 181. № 3. С. 64–71.
8. Заика В.Е., Валовая Н.А., Повчун А.С. и др. Митилы Черного моря. Киев: Наукова думка, 1990. 205 с.
9. Заика В.Е., Макарова Н.П. Продукция зообентоса Черного моря // Экология моря. 1990. Т. 34. С. 82–87.
10. Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А. и др. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
11. Зернов С.А. К вопросу об изучении жизни Черного моря // Записки Импер. Акад. наук. 1913. Т. 32. № 1. 309 с.
12. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: Морской гидрофизический институт, 2011. 212 с.
13. Ивлиева О.В., Фроленко Л.Н. Биогенное карбонатакопление Азовского моря во второй половине XX века // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2009. № 4. С. 96–99.
14. Киселева М.И. Бентос рыхлых грунтов Черного моря. Киев: Наукова Думка, 1981. 168 с.
15. Колочкина Г.А., Любимов И.В., Данилова Н.А. Динамика поселений двустворчатых моллюсков – доминантов рыхлых грунтов Северного Кавказа в начале XXI в. // Морской биологический журнал. 2025. Т. [в печати]. С. 1–29.
16. Колочкина Г.А., Семин В.Л. Макрозообентос // Экологический Атлас. Черное и Азовское моря / Под ред. А.М. Шишкина. ПАО “НК “Роснефть”, ООО “Арктический Научный Центр”, Фонд “НИР”, 2019. С. 157–176.
17. Колочкина Г.А., Семин В.Л., Григоренко К.С. и др. Роль абиотических факторов в вертикальном распределении макрозообентоса северо-восточного побережья Черного моря // Зоологический журнал. 2020. Т. 99. № 7. С. 784–800.
18. Колочкина Г.А., Симакова У.В., Дунка Е. и др. Продолжительность жизни *Anadara kagoshimensis* (Bivalvia) в Азово-Черноморском регионе // Труды IX Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование” (MARESEDU-2020). Т.1. М.: ПолиПРЕСС, 2020. С. 245–248.
19. Косьян А.Р., Кучерук Н.В., Флинт М.В. Роль раковинных моллюсков в балансе осадков Анапской пересыпи // Океанология. 2012. Т. 52. № 1. С. 78–78.
20. Косьян Р.Д., Косьян А.Р., Крыленко В.В. и др. Состав и распределение осадков Анапской пересыпи // Океанология. 2020. Т. 60. № 2. С. 302–314.
21. Кучерук Н.В., Басин А.Б., Котов А.В. и др. Макрозообентос рыхлых грунтов северокавказского побережья Черного моря: многолетняя динамика сообществ // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 289–297.
22. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1978. 392 с.
23. Определитель фауны Черного и Азовского морей: в 3 т. / Ред. Ф.Д. Мордухай-Болтовская. Киев: Наукова думка, 1968–1972. 1312 с.
24. Переладов М.В. Современное состояние популяции Черноморской устрицы // Труды ВНИРО. 2005. Т. 144. С. 254–274.
25. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Углерод в Мировом океане. М.: ГЕОС, 2021. 352 с.

26. Селифонова Ж.П., Часовников В.К. Экологическое состояние зообентоса прикавказской зоны Черного моря (район Джубга–Хоста) // Системы контроля окружающей среды. 2017. Т. 10. № 30. С. 119–128.
27. Стадниченко С.В. Продукционные характеристики двусторчатого моллюска *Mytilaster lineatus* Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон. 2003. Т. 9. С. 241–249.
28. Страхов Н.М. Проблемы современного и древнего осадочного процесса. М.: Наука, 2008. 495 с.
29. Фроленко Л.Н., Живоглядова Л.А., Ковалев Е.А. Результаты исследований зообентоса северо-восточной части Черного моря по данным 2016–2017 гг. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2. № 4. С. 85–97.
30. Чухчин В.Д. Рост рапаны (*Rapana bezoar* L.) в Севастопольской бухте // Тр. Севастоп. биол. ст. 1961. Т. 14. С. 169–177.
31. Шаловенков Н.Н. Распределение чужеродных видов зообентоса на шельфе Черного моря // Российский журнал биологических инвазий. 2021. Т. 14. № 4. С. 157–177.
32. Belyaev N.A., Lyubimov I.V., Fedulov V.Yu. et al. Supply of inorganic carbon by mollusks to bottom sediments of the north-eastern shelf of the Black Sea // Oceanology. 2024. V. 7. P. 1–23. [в печати]
33. Beukema J. Calcimass and carbonate production by molluscs on the tidal flats in the Dutch Wadden Sea: I. The tellinid bivalve *Macoma balthica* // Netherlands Journal of Sea Research. 1980. V. 14. № 3–4. P. 323–338.
34. Beukema J. Calcimass and carbonate production by molluscs on the tidal flats in the Dutch Wadden Sea: II The edible cockle, *Cerastoderma edule* // Netherlands Journal of Sea Research. 1982. V. 15. № 3–4. P. 391–405.
35. Deval M. Growth and reproduction of the wedge clam (*Donax trunculus*) in the Sea of Marmara, Turkey // J. Appl. Ichth. 2009. V. 25. № 5. P. 551–558.
36. Deval M.P., Göktürk D. Population structure and dynamics of the cut trough shell *Spisula subtruncata* (da Costa) in the Sea of Marmara, Turkey // Fisheries Research. 2008. V. 89. № 3. P. 241–247.
37. Iglesias Rodriguez M.D., Armstrong R., Feely R. et al. Progress made in study of ocean's calcium carbonate budget // Eos, Transactions American Geophysical Union. 2002. V. 83. № 34. P. 365–375.
38. Kolyuchkina G.A., Syomin V.L., Simakova U.V. et al. Benthic community structure near the margin of the oxic zone: A case study on the Black Sea // Journal of marine systems. 2022. V. 227. P. 103691.
39. Kolyuchkina G.A., Syomin V.L., Simakova U.V. et al. Presentability of the Utrish Nature reserve's benthic communities for the North Caucasian Black Sea Coast // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2018. V. 3. № 4. P. 1–16.
40. Krumbein W.E., Schellnhuber H.J. Geophysiology of carbonates as a function of Bioplanets // Facets of Modern Biogeochemistry (Festschrift for E.T. Degens). 1990. P. 5–22.
41. Lastra M., Sanchez A., Mora J. Population dynamics and secondary production of *Parvicardium exiguum* (Gmelin, 1790) in Santander Bay (N of Spain) // Journal of molluscan studies. 1993. V. 59. № 1. P. 73–81.
42. Legge O., Johnson M., Hicks N. et al. Carbon on the northwest European shelf: Contemporary budget and future influences // Frontiers in Marine Science. 2020. V. 7. P. 143.
43. Lejart M., Clavier J., Chauvaud L. et al. Respiration and calcification of *Crassostrea gigas*: contribution of an intertidal invasive species to coastal ecosystem CO₂ fluxes // Estuaries and Coasts. 2012. V. 35. № 2. P. 622–632.
44. Mistri M., Munari C. Clam farming generates CO₂: a study case in the Marinetta lagoon (Italy) // Marine pollution bulletin. 2012. V. 64. № 10. P. 2261–2264.
45. Mistri M., Munari C. The invasive bag mussel *Arcuatula senhousia* is a CO₂ generator in near-shore coastal ecosystems // Journal of experimental marine biology and ecology. 2013. V. 440. P. 164–168.
46. Munari C., Rossetti E., Mistri M. Shell formation in cultivated bivalves cannot be part of carbon trading systems: a study case with *Mytilus galloprovincialis* // Marine environmental research. 2013. V. 92. P. 264–267.
47. Revkov N.K., Boltachova N.A. Structure of the macrozoobenthos assemblages in the central part of the northwestern Black Sea shelf (Zernov's Phyllophora field) at the beginning of the 21 st century // Ecologica Montenegrina. 2021. V. 39. P. 92–108.
48. Şahin C., Emiral H., Okumus I. et al. The Benthic Exotic Species of the Black Sea: Blood Cockle (*Anadara inaequalis*, Bruguiere, 1789: Bivalve) and Rapa Whelk (*Rapana thomasiana*, Crosse, 1861: Mollusc) // J. of animal and veterinary advances. 2009. V. 8. № 2. P. 240–245.
49. Sardá R., Pinedo S., Martin D. Seasonal dynamics of macroinfaunal key species inhabiting shallow soft-bottoms in the Bay of Blanes (NW Mediterranean) // Acta Oecologica. 1999. V. 20. № 4. P. 315–326.
50. Thomas H., Bozec Y., de Baar H.J. et al. The carbon budget of the North Sea // Biogeosciences. 2005. V. 2. № 1. P. 87–96.
51. Vasquez M., Agnesi S., Al Hamdani Z. et al. Method for classifying EUSeaMap according to the new version of EUNIS, HELCOM HUB and the Mediterranean habitat types, 2021.
52. WoRMS Editorial Board (2024). World Register of Marine Species. Available from <https://www.marine-species.org> at VLIZ / Editor, WoRMS Editorial Board (2024).

ASSESSMENT OF INORGANIC CARBON INPUT BY MOLLUSKS TO THE COASTAL ZONE OF THE NORTH-EASTERN SECTOR OF THE BLACK SEA IN 2008–2023

G. A. Kolyuchkina^{a, *}, I. V. Lyubimov^{a, b}, V. Yu. Fedulov^a, N. A. Danilova^{a, c}, N. A. Belyaev^a

^a*Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow*

^b*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – MVA named after K.I. Skryabin"*

^c*Department of Biology, University of Padova, Padova, Italy*

^{*}*e-mail: kolyuchkina.ga@ocean.ru*

The masses of inorganic carbon entering the bottom sediments of the northeastern shelf and slope of the Black Sea as a result of the activity of benthic mollusks have been quantitatively assessed. The most effective depths of carbonate matter formation by mollusks are 10–15 m and 60–70 m. Below 80 m, the contribution of this source to the supply of biogenic carbonate to sediments decreases sharply. Spatial and temporal heterogeneity of biomass distribution and inorganic carbon input by mollusks within the same depth belt was revealed. The greatest fluctuations of the input values were observed in the most carbonate productive zone: depths from 10 to 30 m.

Keywords: carbon cycle, inorganic carbon, mollusks, shelf, Black Sea