УДК 551.465

# БИОАККУМУЛЯЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В МАКРОЗООБЕНТОСНЫХ ОРГАНИЗМАХ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

© 2024 г. Л. Л. Демина\*, С. В. Галкин, А. С. Соломатина

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия \*e-mail: l\_demina@mail.ru

> Поступила в редакцию 2023 г. После доработки 2023 г. Принята к публикации 2023 г.

В рамках программы «Морские экосистемы Сибирской Арктики» на основе материалов, собранных в 69-м и 72-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш», исследовано распределение группы химических элементов (As, Ba, Bi, Co, Cr, Cd, Co, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb, Sc, Ti, Tl, Th, V, U и Zn) и органического углерода (С<sub>ор</sub>) в массовых таксонах макрозообентоса моря Лаптевых на полях метановых высачиваний и вне их. Впервые количественно оценен биоаккумуляционный потенциал (БП), учитывающий, наряду с концентрацией элементов в организмах, их биомассу. На метановом поле C-15 популяция офиур аккумулирует каждый из микроэлементов многократно (до 40 раз) больше, чем на фоновой станции. Офиуры и двустворки демонстрируют повышенный БП для Ni, As, Ba, Cu, Ti, V, Mn и Zn по сравнению с другими элементами, при этом офиуры обладают значительно большим БП. Предполагается, что повышенная биоаккумуляция некоторых тяжелых металлов и металлоидов в районах высачивания метана связана с большей биодоступностью органического вещества в донных осадках. Для С<sub>орг</sub> установлен наиболее высокий БП, особенно выраженный на метановом поле C-15. На фоновой биомассе. В результате функционирования грунтоедов донные осадки обогащаются С<sub>орг</sub>, что может свидетельствовать о важном вкладе бентосных организмов в цикл углерода в морях Арктики.

**Ключевые слова:** море Лаптевых, макрозообентосные организмы, донные осадки, тяжелые металлы, органический углерод

DOI: 10.31857/S0030157424010028, EDN: ERCIKP

### введение

Согласно учению А.П. Лисицына о биодифференциации в океане, морская биота осуществляет производство, переработку и транспорт осадочного материала в виде трехступенчатой системы биофильтров: 1) первичное биопродуцирование фитопланктона в зоне фотосинтеза; 2) вторичное биопродуцирование зоопланктона и вертикальные потоки биогенных частиц; 3) трансформация бентосом осадочного материала в поверхностном слое донных осадков [7–10]. Бентосные организмы преобразуют состав органического вещества и нарушают стратификацию осадков (биотурбация). Сестонофаги поглощают из придонных вод рассеянное осадочное вещество, а детритофаги и грунтоеды — из донных осадков, концентрируя в своих телах химические соединения, включая загрязнители — потенциально токсичные тяжелые металлы и металлоиды [9, 10].

Море Лаптевых относится к числу наиболее ледовитых арктических морей, однако за последние десятилетия площадь ледового покрытия в летний период заметно уменьшилась в связи с возрастанием среднегодовых значений температуры воздуха и объем речного стока [14–16]. Транспорт осадочного материала и загрязняющих веществ в море Лаптевых осуществляется вследствие ледового разноса и трансполярного дрифта льда, при этом взвешенный терригенный материал аккумулируется с последующей разгрузкой в летний период [28]. Важным источником поступления тяжелых металлов в море Лаптевых служит речной сток Лены и Хатанги. Однако сток р. Лены можно отнести к числу наименее загрязненных среди крупных рек на основании того, что растворенные в воде тяжелые металлы (кроме Fe) оказались на уровне самых низких концентраций, а As, Сd и Pb даже ниже, чем в других реках мира [37]. Другим источником загрязнения арктических морей служат аэрозоли дальнего переноса, в субмикронных фракциях которых повышены концентрации тяжелых металлов [6]. Аэрозоли Арктики обогащаются тяжелыми металлами в результате деятельности горно-металлургических комбинатов Норильска, Кольского п-ва, а также вследствие лесных пожаров, а зимой этому способствует дальний перенос частиц из среднеширотных районов Евразии [17]. Очевидно, вследствие этих процессов повышенные содержания As, Cr, Ni, Cu, Cu и Pb установлены в донных осадках наиболее глубоких частей моря Лаптевых [44].

В последние годы Восточно-Сибирский арктический шельф интенсивно исследовался в связи с зарегистрированными в ходе многих экспедиций повышенными концентрациями метана в атмосфере и гидросфере. Метан является «парниковым» газом, эманации которого, обусловленные дегралацией многолетнемерзлых пород, могут вызывать потепление климата подобно углекислому газу Обобщение большого массива сейсмических данных по зонам подводной мерзлоты на шельфе Восточно-Сибирского, Лаптевых, Чукотского и Бофорта морей позволило сделать вывод о не столь значительном вкладе эмиссии метана при диссоциации газогидратов в потепление климата [22]. В 1993 и 1995 гг. в море Лаптевых экспедициями НИС «Полярштерн» была впервые зарегистрирована фауна сибоглинид, трофически зависимая от метана [13]. Во время экспедиций НИС «Академик Мстислав Келлыш» в 2015-2018 гг. на глубине около 72 м были описаны холодные метановые высачивания с обилием макрофауны, ассоциированной с метанотрофными и хемоавтотрофными бактериями [15, 21, 45, 46, 49]. Ранее подобные явления в Арктике были описаны только на глубинах свыше 200 м [20, 33, 42].

Микробные сообщества, функционирующие в районах метановых высачиваний, нуждаются

в ряде микроэлементов, входящих в состав металлоэнзимов, необходимых для катализа важных биохимических реакций [34]. Исследования элементного состава фауны метановых высачиваний впадины Дерюгина в Охотском море [4] и Корякского склона в западной части Берингова моря [30] выявили высокое содержание ряда тяжелых металлов в мягких тканях и жабрах симбиотрофных двустворчатых моллюсков везикомиид, что обусловлено высокими концентрациями элементов в придонной воде этих восстановительных биотопов.

Несмотря на то что море Лаптевых характеризуется значительным разнообразием бентических сообществ, особенности биоаккумуляции металлов остаются пока мало изученными, в частности, не оценено влияние метановых высачиваний на уровни концентраций элементов в донной фауне.

Целями данной работы являются: 1) анализ концентраций и распределения ряда химических элементов в массовых таксонах макрозообентоса моря Лаптевых на полях метановых высачиваний и вне их; 2) выявление влияния факторов окружающей среды на биоаккумуляцию элементов массовыми группами макрозообентоса; 3) оценка биоаккумуляционного потенциала ведущих групп бентоса для химических элементов и органического углерода.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал для исследования был собран в рамках программы «Морские экосистемы Сибирской Арктики» в экспедициях 69-го и 72-го рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2017 и 2018 гг.) Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (рис. 1, табл. 1).

		K	оординаты касани	я (для трала Сигсб	и)
Станция	Глубина моря, м	Широта	северная	Долгота в	восточная
		град	МИН	град	МИН
5623	63	76	53.677	127	48.157
5624	70	76	50.000	126	39.608
5625	71	76	46.512	125	49.346
5590-2	62	77	10.006	114	40.822
5635	777	78	2.318	115	50.292
5636	225	77	54.238	104	55.174
5947	72	76	46.846	125	49.173
5953	63	76	53.591	127	48.276

Таблица 1. Станции пробоотбора макрозообентоса и донных осадков в море Лаптевых



**Рис. 1.** Карта-схема пробоотбора фауны и донных осадков в экспедициях 69-го и 72-го рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2017 и 2018 гг.

Для сбора макрофауны использовали трал Сигсби со стальной рамой шириной 2.0 м. Трал был оснащен двойным мешком: наружный мешок сделан из двойной узловой капроновой дели из веревки 3.1 мм с ячеей 45 мм; внутренний из безузловой дели с ячеей 4.0 мм. Полученную пробу промывали на системе стальных сит с ячеей 5.0 и 1.0 мм. Разборку проб вели по стандартной методике, принятой в экспедициях ИО РАН. В каждой точке отбора траловых проб фиксировали основные характеристики среды обитания (табл. 2). Весь материал, по возможности, определяли до вида. Образцы животных, предназначенных для химических анализов, отбирали непосредственно из непромытой пробы (чтобы избежать контакта с водой из судовой системы). После трехкратной промывки дистиллятом образцы помещали в стеклянные чашки и высушивали в термостате при температуре 55-60°С. Препарирование животных проводили с использованием пластмассовых инструментов. В организмах двустворок раковины и мягкие ткани анализировали раздельно, в случае офиур, морских звезд и голотурий отдельно анализировали тело без кишечника и содержимое кишечника, ракообразных брали как целые тела (тотально, т.е. без препарирования). Анализируемые в данной работе животные представлены четырьмя группами: двустворчатые моллюски (Portlandia arctica, Similepecten greenlandis); иглокожие: морские

звезды (*Ctenodiscus crispatus*); офиуры (*Ophiocten sericeum*) и голотурии (*Myriotrochus rincki*.) Следует отметить, что для минимизации воздействия физиологических факторов на биоаккумуляцию химических элементов внутри каждой из четырех групп подбирали особи с близким средним размером.

Поверхностные донные осадки для анализа элементного состава отбирали на станциях пробоотбора макрозообентосных организмов из слоя 0–1 см дночерпателями Ван-Вина, Океан-0.25 или бокскорера. В судовой лаборатории пробы осадков без промывки высушивали в термостате при температуре 55–60°С.

В стационарной лаборатории перед анализом каждый образец тщательно растирали в агатовой ступке. Полное разложение высушенных и растертых образцов (масса в среднем составляла 60 мг) проводили в смеси 2 мл концентрированной перегнанной азотной кислоты (69% HNO<sub>3</sub>) и 1 мл перекиси водорода (30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) в тефлоновых сосудах на нагревательной платформе при  $80-90^{\circ}$ С. При наличии достаточной массы (более 60 мг сухого вещества) для каждой отдельной пробы проводили параллельные анализы. После выпаривания анализируемых образцов до влажных солей конечный объем раствора (20 мл) устанавливали 5% раствором HNO<sub>3</sub>. На каждые 7 образцов проводился один бланковый анализ. Концентрации

Стан-	Глубина,	Доминирующие группы (опре-	Руководящие виды (играют заметную	Литология поверх- ностного (0–3 см)	Характо воды	еристик (горизо от дн	и надд нт 0—1: 1а)	онной 5 см
ция	M	сообщества)	роль в сообществе)	осадков	<i>T</i> , °C	S, psu	О <sub>2</sub> , мл/л	0 <sub>2</sub> , %
5590-2	60	Ophiocten sericeum	Ophiacantha bidentata, <u>Urasterias</u> <u>lincki</u> , Ciona intestinalis	Алевропелит с тон- козернистым (т/з) песком, текучий, мягкий	-1.68	33.85	7.28	85.7
5635	777	Melinnopsis arctica, <u>Ophiopleura</u> <u>borealis</u>	Epizoanthus erdmanni, Verum striolatum, Bathybiaster vexillifer	Алевропелит одно- родный вязко-те- кучий	0.15	34.86	6.69	83.4
5636	225	Ophiopleura borealis	Yoldiella lenticula, <u>Ctenodiscus crispatus</u>	Алевропелит с т/з песком вязко-те- кучий	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.
5623 поле Оден	63	Ophiocten sericeum	<u>Similipecten</u> greenlandicus, <u>Urasterias lincki,</u> Strongylocentrotus pallidus	Алевропелит с т/з песком. Вязко-те- кучий, на поверх- ности и в верхней части многочис- ленные погонофо- ры, ходы полихет, заметная примесь песка	-1.80	34.10	7.27	85.5
5624	70	Ophiocten sericeum, Portlandia arctica	<u>Ctenodiscus crispatus,</u> Urasterias lincki, Ampeliscidae	Алевропелит, вязко-текучий, на поверхности зерна песка	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.
5625 поле С 15	71	Ophiocten sericeum	Craniella polyura, Frigidalvania sp., Ctenodiscus crispatus	Алевропелит с т/з песком. Верхний окисленный слой частично смыт, вязко-текучий	-1.77	34.10	7.27	85.5
5947 поле С 15	72	Ophiocten sericeum	<i>Frigidalvania</i> sp., <u></u> <u>Ctenodiscus crispatus</u>	Алевропелитовый ил с примесью песка	-1.82	34.34	5.76	67.8

**Таблица 2.** Ведущие группы макробентоса и характеристика среды обитания в море Лаптевых (по траловым пробам) (анализируемые виды подчеркнуты)

химических элементов в образцах определяли в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСМ-МС) на приборе «Agilent 7500а» (США). Точность определения концентрации для всей группы анализируемых элементов варьировала 0.3 до 7.8%, определяемой из двух повторностей. Правильность анализа контролировалась сертифицированными эталонными образцами Национального института стандартов Канады NIST 2976 (ткань мидий) с отклонением от референтного значения от 0.7 до 9.5%. В донных осадках содержание Si, Al, Ca, Fe, Mn, V, Cr, Co, Ni, Co, Cu, Zn, Zr, Ba, As, Mo onpegeляли методом рентгено-флуоресцентного анализа (РФА) на приборе «Спектроскан МАКС-GVМ» (НПО Спектрон, Россия). Правильность анализа контролировали одновременным анализом отечественных и международных стандартных

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

образцов СДО-1и NIST 2702 (морские донные отложения).

Содержание общего углерода и неорганического углерода измеряли в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН на приборе Shimadzu TOC-L-CPN (Япония); содержание органического углерода рассчитывали по разности между общим и неорганическим углеродом. Гранулометрический состав донных осадков определяли в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН с использованием лазерного дифракционного анализатора размеров частиц Shimadzu SALD2300 (Япония). Статистическую обработку данных осуществляли с помощью программного пакета Statistica-10.0. Корреляции между исследуемыми элементами в организмах и осадках рассчитаны с использованием коэффициентов ранговой корреляции Спирмена (корреляция Спирмена).

### РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Море Лаптевых представляет собой шельфовый арктический бассейн с суровым климатом, ледовым покровом до 10 месяцев в году, отрицательными температурами воды и средней соленостью ниже 30‰. Гидрохимическая структура морских вод находится под влиянием речного стока Лены [11]. Море Лаптевых характеризуется невысокой первичной продукцией, резко падающей от дельты р. Лены до внешнего шельфа (от 720 до менее 100 мгС/м<sup>2</sup> в день соответственно) [47], а также низкими концентрациями С<sub>орг</sub> в воде, взвеси и донных осадках [12].

В 2017 и 2018 гг. в экспедициях НИС «Академик Мстислав Келдыш» по программе «Морские экосистемы Сибирской Арктики» на внешнем шельфе моря Лаптевых были изучены два поля холодных метановых высачиваний С-15 и Оден, сконцентрированных на участках поперечником до 5 км и отстоящих друг от друга на 50 км [15, 16]. По результатам гидролокационной съемки зафиксированы газовые «факелы», визуально обнаружены многочисленные бактериальные маты и установлены участки наибольшей активности метановых сочений, которые на поле С-15 оказались более интенсивными, чем на поле Оден [21, 49]. Оба поля расположены на сегменте, который протягивается с юго-запада на северо-восток вдоль рифтовой системы моря Лаптевых, зоны разлома Хатанга-Ломоносов и соединения с хребтом Гаккеля. Неглубокие разломы связаны с прогибанием внешнего шельфа, разрезающим толщу многолетнемерзлых пород и газогидратов, способствуя миграции газа к поверхности осадочной толщи, начиная с периода последней дегляциации [21]. Содержание метана в поверхностных осадках этих полей, а также скорости анаэробного метанокисления и сульфатредукции значительно ниже, чем в зонах активной разгрузки углеводородов, таких как Хаакон Мосби, Мексиканский залив и др. [46].

В море Лаптевых донная фауна была собрана на шести станциях, расположенных вдоль Хатангского разреза на внешней кромке шельфа (ст. 5590-2), континентальном склоне (ст. 5635), в проливе Вилькицкого (ст. 5636), а также на двух полях метановых высачиваний (ст. 5623, поле Оден, ст. 5625, поле С-15) и фоновом районе (ст. 5624) (см. табл. 2).

Гидрохимические исследования установили, что в море Лаптевых влияние речного стока Хатанги прослеживается на значительном расстоянии (до 500 км) от устья реки [11]. Состав организмов на ст. 5590-2 соответствует характерному для этого района сообществу с доминированием офиур *Ophiocten sericeum* и *Ophiopleura borealis*. Значительное количество видов сестонофагов, таких как офиуры Gorgonocephalus arcticus, Ophiacantha bidentata и асцидии Ciona intestinalis косвенно свидетельствует о наличии достаточно активной придонной гидродинамики в данном районе. Суммарно в пробе найдено не менее 30 видов организмов макробентоса. На ст. 5635 доминировали офиуры Ophiopleura borealis и глубоководные арктические полихеты Melinnopsis arctica.

Согласно литературным данным, это сообщество широким поясом охватывает почти весь склон арктических морей от Карского до Восточно-Сибирского морей на глубинах 510–1580 м [13]. Кроме батиальных видов, в трале обнаружены эврибатные виды, характерные также для шельфовых глубин (офиуры *Ophiocten sericeum*). На ст. 5636 (пролив Вилькицкого, глубина 225 м) трал был взят в широко распространенном на нижне-сублиторальных и верхне-батиальных глубинах сообществе с доминированием офиур *Ophiopleura borealis*. Несколько менее многочисленны двустворчатые моллюски *Yoldiella lenticula* и морские звезды *Ctenodiscus crispatus*. В пробе обнаружено не менее 25 видов макробентоса.

В районе метановых высачиваний (поля С-15 и Оден) на станциях 5623 и 5625 температура и соленость придонной воды (15 см от дна) составили -1.8°С и 34.1‰ соответственно, концентрация и насыщаемость O<sub>2</sub> - 7.27 мл/л и 85.5% соответственно. Отметим, что на поле С-15 (ст. 5947) последние два параметра заметно понижены — 5.76 мл/л и 56.8% (см. табл. 2). Под тонким слоем слабо окисленного поверхностного слоя осадков серовато-коричневатого цвета залегают темно-серые до черного восстановленные алевропелиты с примесью тонкозернистого песка. На полях разгрузки метана в море Лаптевых установлены высокие скорости анаэробного метанокисления метанотрофными бактериями, что обусловливает восстановительную среду в осадках (Eh от -50до -160 мВ) за исключением тонкого поверхностного слоя (1-2 см), слабо окисленного и биотурбированного симбиотрофными трубчатыми червями [45, 46]. Качественный и количественный состав траловой пробы свидетельствует о том, что в районе метановых выходов обитает сообщество с доминированием офиур Ophiocten sericeum, типичное для шельфовых глубин всех сибирских морей. Наличие большого количества трубок погонофор Oligobrachia haakonmosbiensis свидетельствует об однозначной реакции фауны на метановые высачивания в этом районе. Примерно в двух милях к западу от сиповой ст. 5623 взята ст. 5624 (глубина 70 м) в фоновом сообществе с доминированием детритофагов офиур Ophiocten sericeum, также в число доминантов входит двустворчатый моллюск Portlandia arctica. Интересно в целом меньшее разнообразие макробентоса на фоновой станции в сравнении с сиповой — обнаружено

лишь 34 вида. Ст. 5625 (глубина 71 м) взята на поле метановых высачиваний Оден, здесь доминирует офиура Ophiocten sericeum. Крайне многочисленны губки Craniella polyura, морские звезды Ctenodiscus crispatus. Кроме того, как и на ст. 5623, в пробе ст. 5625 обнаружено большое количество трубок симбиотрофных погонофор Oligobrachia haakonmosbiensis, свидетельствующих об отклике макрофауны на наличие метановых сочений. Донное сообщество полей метановых выходов в целом сохраняет свою структуру, при этом обилие макрофауны значительно выше, чем на фоновых станциях: общая численность макрозообентоса составляла от 2500 до 10000 экз./м<sup>2</sup>, а биомасса от 50 до 150 г/м<sup>2</sup> [49]. Явным доминантом зон метановых высачиваний являются офиуры Ophiocten sericeum. Это сообщество широко распространено на шельфе арктических морей. Биологическим следствием высачиваний в исследованном районе является массовое развитие симбиотрофов погонофор Oligobrachia haakonmosbiensis, образующих сплошные «ковры» площадью до нескольких квадратных метров. Однако такие поселения часто сменяются безжизненными участками «фонового» осадка, в силу чего определить их общую площадь затруднительно. По нашим наблюдениям, поселения погонофор служат удобным местообитанием для мелких животных, прежде всего молоди Ophiocten, находящих здесь убежище.

По данным наблюдений с видеомодуля, рельеф зоны метановых высачиваний сглаженный. дно полностью покрыто осадками светло-коричневого цвета с темными пятнами осадка (от нескольких квадратных сантиметров до метра). Пятна ассоциированы с бактериальными матами слабой плотности. Наиболее многочисленные представители эпифауны — офиуры Ophiocten sericeum. Их численность на поле C-15 составляет в среднем до 15 экз./м<sup>2</sup>, а на поле Оден достигает 50-70 экз./м<sup>2</sup>. На обоих полях многочисленны морские гребешки Similipecten greenlandicus, особенно на поле Оден, где они входят в число руководящих групп. Заметную роль в сообществе обоих полей играют морские звезды Ctenodiscus crispatus u Urasterias lincki (см. табл. 2).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

В донной фауне моря Лаптевых мы анализировали массовые таксоны макрозообентоса, обладающие разным типом питания: детритофаги и сестонофаги (двустворчатые моллюски), детритофаги (офиуры, голотурии) и грунтоеды (морские звезды). В двустворчатых моллюсках помимо тотальных проб (без препарирования) анализировались раздельно раковины и мягкие ткани, в морских звездах, офиурах и голотуриях –

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

тело без кишечника и содержимое кишечника (раздельно). Исследуемые нами таксоны приведены в табл. 3.

Рассмотрим распределение элементов в четырех группах организмов и их органах/тканях.

Вivalvia Similipecten greenlandicus (сестонофаг) и Portlandia arctica (детритофаг). В табл. 4 представлены средние концентрации элементов в мягких тканях и раковинах двустворчатых моллюсков Similipecten greenlandicus и Portlandia arctica, доминирующих на метановых полях Оден (ст. 5623) и С-15 (ст. 5947), а также для сравнения — P. arctica из Восточно-Сибирского моря (ст. 5615, неопубликованные данные авторов). Отметим, что в обоих случаях среда обитания животных характеризуется близкими значениями температуры придонного слоя, содержания кислорода и солености (см. табл. 2).

Вариабельность концентраций всех исследуемых элементов в мягких тканях морского гребешка S. greenlandicus очень высока: от менее 0.01 до 56 мкг/г сух.в., то есть составляет около четырех порядков десятичных величин. В диапазоне концентраций менее 1 мкг/г сух.в. находятся потенциально токсичные Ag, Bi, Pb, Th, Tl, эссенциальные Со и Cr, а также литогенный рассеянный элемент Sc. Мягкие ткани демонстрируют преимущественное по сравнению с раковинами накопление большинства микроэлементов, наиболее выраженное для As, Zn, Cd, V, Mo, Ni, Cr и Ag (см. табл. 4). Сравнение с двустворчатыми моллюсками, собранными вне полей метановых высачиваний, показывает почти трехкратное превышение концентрации As и Cd в мягких тканях морского гребешка S. greenlandicus по сравнению с таковыми для P. arctica, что возможно связано с антропогенным фактором (см. ниже).

Для количественной оценки распределения элементов между мягкими тканями и карбонатными раковинами Bivalvia был предложен коэффициент Kd (С<sub>эл. мяг. тк</sub>./ С<sub>эл. раков</sub>.) [4]. Значения Kd, превышающие 1, свидетельствуют о преимущественном накоплении элементов в мягких тканях, обогащенных органическим углеродом, по сравнению с раковинами. На рис. 2 показаны средние значения Kd для двустворчатых моллюсков S. greenlandicus и P. arctica, обитающих на полях метановых выходов Оден и C-15, а также P. arctica из Восточно-Сибирского моря (ст. 5615). Значение Kd для большинства элементов превышает 1.5, то есть они накапливаются в мягких тканях относительно раковин, при этом значения Kd сильно варьируют — от 1.5 (Sc, Mn, Cu, Ba) до 51 (Cd). Отметим, что различия между Kd Sc, Ti, Cr, Со, Си, Ва и Рь во всех трех случаях весьма незначительны.

Станция	Группа	Вид	Анализируемый объект (количество экземпляров)	Тип питания
	Asteroidea	Ctenodiscus crispatus	Тело (3), содержимое желудка (3)	Грунтоед
5(22*	Holothuroidea	Myriotrochus rincki	Тело без кишечника (8), содержимое кишечника (8)	Грунтоед
3623*	Ophiuroidea	Ophiocten sericeum	Тело без кишечника (12), содержимое кишечника (8)	Детритофаг
	Bivalvia	Similipecten greenlandicus	Мягкие ткани (4), раковина (4)	Сестонофаг
5624	Asteroidea	Ctenodiscus crispatus	Тело (5), содержимое желудка (8)	Грунтоед
3024	Ophiuroidea	Ophiocten sericeum	Тотально (12)	Детритофаг
	Asteroidea	Ctenodiscus crispatus	Тело (3), содержимое желудка (3)	Грунтоед
5625**	Holothuroidea	Myriotrochus rincki	Тело без кишечника (4), содержимое кишечника (4)	Грунтоед
	Ophiuroidea	Ophiocten sericeum	Тотально (10)	Детритофаг
5947**	Bivalvia	Portlandia arctica	Мягкие ткани (22), раковина (22)	Детритофаг
	Asteroidea	Bathybiaster vexillifer	Тело (3), содержимое желудка (3)	Грунтоед
5635	Ophiuroidea	Ophiopleura borealis	Тело без кишечника (7), содержимое кишечника (3)	Детритофаг
5636	Asteroidea	Ctenodiscus crispatus	Тело (4), содержимое желудка (4)	Грунтоед
	Ophiuroidea	Ophiopleura borealis	Тотально (4)	Детритофаг
5590-2	Asteroidea	Ctenodiscus crispatus	Тело (3), содержимое желудка (3)	Грунтоед

Таблица 3. Исследуемые виды макрозообентоса

Примечание. \* поле Оден, \*\* поле С-15.



**Рис. 2.** Сопоставление средних значений Kd для двустворчатых моллюсков *S. greenlandicus и P. arctica*, обитающих на полях метановых выходов Оден и C-15 соответственно, и *P. arctica* (ст. 5615, Восточно-Сибирское море).

В одном и том же виде *P. arctica*, но из двух разных районов, значения Kd V, Cr, Mn, Co, As, Tl, Th, U и особенно Cd значительно выше в организмах из поля метанового выхода C-15, чем в Восточно-Сибирском море. Сравнение двух разных видов двустворчатого моллюска *S. greenlandicus* (поле Оден) и *P. arctica* (поле C-15), показывает, что в последнем случае Kd тяжелых металлов V, Cr, Mn, Zn, Th и U заметно выше. В то же время Cd, Tl и металлоид As в фильтраторе-сестонофаге морском гребешке *S. greenlandicus* показывают пиковые значения Kd (от 10 до 51), где они накапливаются в значительно большей степени, чем в *P. arctica*.

18

**Ophiuroidea** *Ophiocten sericeum* (детритофаг). В табл. 5 приведены концентрации элементов в организмах офиур (в тотальных пробах, теле и содержимом желудков).

Концентрации всех исследованных элементов в содержимом желудка офиуры намного (до 10 раз) больше, чем в ее теле (без желудка). Наименее контрастное распределение между этими органами показывают Ni, Cu, Zn, Cd, Mo, Ag и U. В содержимом желудка офиур, обитающих на полях метановых выходов, выявлены наиболее высокие концентрации большинства элементов: Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, As, Cd, Mo, Ba, Tl, Pb, Bi и Th. Следует отметить, что максимальная концентрация Zn обнаружена в содержимом желудка офиуры с континентального склона (ст. 5635), тогда как As, Cd и U — в тотальных пробах из пролива Вилькицкого (ст. 5636) (см. табл. 5).

Нами рассчитан коэффициент Kd, характеризующий накопление микроэлементов в мягком теле офиуры относительно содержимого желудка (рис. 3). Все элементы показали отсутствие накопления в мягких тканях относительно содержимого желудка (Kd < 1) офиур *Ophiocten sericeum*, обитающих на поле метановых выходов Оден (ст. 5623) и на континентальном склоне (ст. 5635). При этом Kd тяжелых металлов Ni, Cu, Zn и Ag в организмах поля Оден существенно выше, чем в фоновом районе (ст. 5635), а для литогенных элементов Sc, Ti, V, Cr, Mn, Ba, Pb, Bi, Th и U наоборот.

На рис. 4 представлены средние концентрации элементов в тотальных пробах офиуры из поля

метановых высачиваний в сравнении с фоновыми станциями — мелководной ст. 5624 и глубоководной ст. 5636 из пролива Вилькицкого. Из всех исследованных элементов только V, Co, Mo, Tl и Pb показали незначительное превышение концентраций (до двух раз) в тотальных пробах офиур из метановых выходов на поле C-15 (ст. 5625) по сравнению с фоновой станцией 5624. В тотальных пробах офиур из пролива Вилькицкого (ст. 5636) значительно повышены содержания Zn, As, Cd, Ag и U, что возможно связано с влиянием антропогенного фактора.

Asteroidea *Ctenodiscus crispatus* (грунтоед). Микроэлементы в теле и желудке морской звезды *Ctenodiscus crispatus* исследованы на четырех фоновых станциях 5624, 5635, 5636, 5590-2 и двух станциях на полях метановых высачиваний Оден и C-15 (табл. 6).

Большинство исследованных элементов показывает значительно более высокие концентрации в содержимом желудка по сравнению с остальным телом. Особенно выражен этот контраст для литогенных элементов Ti, V, Cr, Mn, Ni, Tl, Bi, Th. Существенного различия между концентрациями большинства элементов в органах морской звезды из полей Оден и С-15 и вне их не выявлено (табл. 6). Отметим высокие концентрации Cd и Мо в теле морской звезды на поле Оден (ст. 5623). Повышенные содержания Mn и Ag определены в теле и содержимом желудка Ctenodiscus crispatus из пролива Вилькицкого (ст. 5636). Мышьяк, Pb и Zn выделяются повышенными содержаниями в теле и содержимом желудка морской звезды, обитающей на континентальном склоне (ст. 5635).



**Рис. 3.** Сопоставление средних значений Kd для офиур *Ophiocten sericeum*, обитающих на поле метановых выходов Оден (ст. 5623) и континентальном склоне (ст. 5635) моря Лаптевых.

CT.	Bivalvia	Орган/ ткань	Sc	Ti	>	Cr	Mn	Co	Ż	Cu 2	Zn	As	Cd	Mo	Ag	Ba	TI	Pb	Bi	Γh	Ŋ
6673	Similipecten	1	0.22	18.2	3.5	0.7	56	0.64	18.3	7.5	55	41	9.25	-	0.12	1.8	0.007	0.67	0.006	0.09	0.16
C70C	greenlandicus	2	0.12	3.6	1	0.1	44	0.23	4	3.1	7	1.7	0.18	0.29	0.015	1.6	0.0005	0.27	0.001	0.02	0.03
		1	0.37	46	7.6	2.2	207	1.81	5.8	8.9	153	17.7	1.60	3.91	Н.д.	24.1	0.032	0.96	0.020	0.54	0.27
5947	<i>Portlandia</i> <i>arctica</i>	2	0.19	8.3	1.5	0.22	40	0.57	3.5	16.8	11.3	0.93	2.18	0.13	Н.д.	18.5	0.003	0.21	0.006	0.053	0.027
		Тотально	0.21	12	2.1	0.24	57	0.7	3.73	16.1	16.3	2.6	2.2	0.51	Н.д.	19.1	0.003	0.12	0.001	0.11	0.054
5175	Portlandia	1	0.17	28	2.4	0.6	156	1.7	4.0	7.4	31	13.8	8.4	1.5	0.1	19.6	0.023	2.57	0.044	0.14	0.17
C10C	arctica	2	0.2	6.4	2.9	0.15	100	2.3	4.2	9.5	7.4	1.05	0.27	4.0	0.02	28.4	0.017	1.23	0.005	0.03	0.051
лэwndЦ	ание. 1 — мягки	е ткани, 2 – раков	ина; н.	д. — н	ет данн	HЫX.															

Таблица 5. Средние концентрации химических элементов (мкг/г сух.в.) в организмах офиуры Ophiochten sericium

U	0.21	0.3	0.24	0.24	0.21	0.2	0.45
Th	0.03	0.64	0.05	0.02	0.02	0.06	0.02
Bi	0.001	0.03	0.001	0.001	0.001	0.01	0.001
Pb	0.27	8	0.17	0.05	0.55	1.3	0.11
ΤI	0.003	0.06	0.002	0.001	0.005	0.03	0.001
Ba	5.7	87	6.1	5	7.7	24.7	9
Ag	0.04	0.07	0.02	0.02	0.11	0.22	0.44
Mo	0.24	1.1	0.22	0.17	0.11	0.4	0.16
Cd	0.25	1.15	0.45	0.45	0.31	1.01	1.27
As	4.2	20	4.9	7.9	6.3	9.2	37
Zn	38	46	40	42	24	35	96
Cu	13.1	17.8	12.5	11.4	2	3.3	1.8
Ni	64	79	2.6	3.5	2.5	13	2.6
Co	0.35	4.59	0.32	0.21	0.3	1.07	0.21
Mn	27	152	24	25	32	124	25
Cr	0.3	15	0.5	0.3	1	8	0.6
Λ	1.3	22	19	6	1.2	6	0.7
Ti	8	88	18	16	10	84	48
Sc	0.14	1.3	0.16	0.10	90.0	0.10	0.14
Орган/ткань	1	5	Тотально	Тотально	1	7	Тотально
Станция	6673	C70C	5625	5624	3673	(coc	5636

ДЕМИНА и др.

чника.
ое кише
омиждэ
2 – co
учника,
з кише
гело бе
1
Примечание.

Taблица 4. Средние концентрации химических элементов (мкг/г сух.в.) в организмах двустворок Similipecten greenlandicus и Portlandia arctica



**Рис. 4.** Сопоставление средних концентраций микроэлементов в тотальных пробах офиур *Ophiocten sericeum*, обитающих на полях метановых высачиваний C-15 (ст. 5625) с фоновыми станциями 5636 и 5624.



**Рис. 5.** Сопоставление средних значений Kd для морских звезд *Ctenodiscus crispatus*, обитающих на полях метановых выходов Оден и C-15, с фоном — мелководной ст. 5624 и более глубоководными ст. 5635 и 5636.

На рис. 5 показано распределение средних значений коэффициента Kd для морской звезды, обитающей на полях Оден и C-15 (ст. 5623 и 5625), фоновой мелководной станции 5624 (глуб. 70 м), а также фоновых, но более глубоководных станций на континентальном склоне (ст. 5635) и в проливе Вилькицкого (ст. 5636). На всех этих станциях из исследуемых элементов только тяжелые металлы Cu, Zn, Cd и Ag показали обогащение (Kd >1) в теле звезды, причем Cd и Ag значительное (Kd = 10 и более соответственно), на метановых полях это особенно четко выражено для Cd, среднее значение Kd которого достигает

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

60 (см. рис. 5). Концентрации других тяжелых металлов, металлоидов и литогенных элементов многократно ниже в теле морской звезды по сравнению с ее желудком: Кd варьирует от менее 1 до 0.01 и менее. Примечательно, что во всех случаях Kd для Sc, Ti, V, Cr, Ni, Ba, Pb, Th и U (т.е. преимущественно литогенных элементов) заметно выше в морской звезде на более глубоководных станциях вне полей метанового высачивания (см. рис. 5).

Ноютритона *Мугіотгосhus гіпскі* (грунтоед). В табл. 7 приведены концентрации элементов в теле и содержимом кишечника голотурии *Myriotrochus rincki*, обитающих на полях метановых высачиваний Оден и С-15, а на ст. 5615 из фонового района Восточно-Сибирского моря (ст. 5615).

В содержимом кишечника голотурии с полей метановых выходов определены максимальные концентрации Cr, V, Mn, Ni, Mo и Ba, а также более намного более высокие концентрации большинства элементов, чем в ее теле. Исключением являются Zn, As, Cd и Ag, которые показывают максимальные концентрации в теле голотурии, причем это справедливо не только для полей Оден и C-15, но и для фоновой ст. 5615, где также заметно повышены концентрации Th и U.

Коэффициент распределения элементов Kd в голотурии *Myriotrochus rincki* для большинства элементов многократно ниже 1, то есть концентрация их в (мягком) теле существенно ниже, чем в содержимом кишечника (рис. 6). Только тяжелые металлы Zn, Cd, Ag, а также металлоид As показывают заметное обогащение (Kd 2 -3) на полях Оден и C-15, а также на фоновой станции Восточно-Сибирского моря.

**Органический и карбонатный углерод в донных организмах.** Результаты анализа представлены в табл. 8.

Высокие концентрации органического углерода установлены в мягких тканях двустворок и телах без кишечника остальных организмов (см. табл. 8). Мягкие ткани Bivalvia и тело Holothuroidea без кишечника характеризуются наибольшими концентрациями  $C_{opr}$  (до 37.8%). Самые низкие содержания  $C_{opr}$  определены в органо-минеральных компонентах содержимого

кишечника морской звезды и раковины Bivalvia (3.3 и 2.9% соответственно). Раковина двустворки содержит в среднем 11.64%  $C_{\text{карб}}$  т.е. почти нацело состоит из карбоната кальция — 97% (пересчет умножением на коэффициент  $8.33 = \text{CaCO}_3/\text{C}_{\text{карб}}$ ). Целое тело офиуры также является в значительной степени карбонатным — до 80%  $\text{CaCO}_3$ . Тела без кишечников Ophiuroidea и Asteroidea также обогащены карбонатом кальция (89.3 и 65.7% соответственно). В содержимом кишечника детритофагов и грунтоедов не обнаружено  $C_{\text{карб}}$ , что отражает обедненный карбонатами состав вмещающих осадков (см. табл. 8).

Гранулометрический и элементный состав поверхностных донных осадков. По нашим данным, поверхностные донные осадки исследуемых районов моря Лаптевых на 80-97% представлены алевритопелитовыми илами, причем в среднем более 60% приходится на алевритовую фракцию (табл. 9). Пелитовая фракция варьирует от 16.3 до 27.54%. Песчаная фракция либо отсутствует, либо составляет от первых процентов до 6.6% (ст. 5636 в проливе Вилькицкого). Интересно отметить, что на поле Оден (ст. 5623) содержание песка весьма значительно (20.46%), как и было отмечено при литологическом описании на борту судна (см. табл. 2), и намного больше, чем на поле С-15 (3.32%); последнее остается трудно объяснимым фактом. Эти поля отстоят друг от друга примерно на 50 км, и на поле Оден можно предположить более высокие скорости придонных течений, что приводит к вымыванию из осадка более тонкозернистых фракций.

Содержание  $C_{opr}$  в осадках с поля Оден (ст. 5623) понижено в 2–3 раза по сравнению с фоновыми станциями.



**Рис. 6.** Сопоставление средних значений Кd для голотурий *Myriotrochus rincki*, обитающих на полях метановых выходов Оден и С-15 с фоновой станцией 5615 (Восточно-Сибирское море).

сских эл Сг 0.2 0.3 46 49 49 0.3 57 57 2.1 72 2.1 72 72 55 37 37 37 37 33 8 33 33 33 33 33 8 33 33 33 33 33 33	СКИХ ЭЛЕМЕНТТ СГ МП 0.2 169 0.2 169 0.3 180 49 1690 0.3 208 57 2021 2.1 171 72 1199 0.5 49 0.4 255 55 3151 жимое кишечни сКИХ ЭЛЕМЕНТС СГ МП 0.4 84 3.3 2075 3.3 205 3.3 205 2.3 205 2.3 205 2.3 205 2.3 205 2.3 205 2.3 205 2.3 205	СКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКГ   Cr Min Co   0.2 169 0.35   446 1296 9.43   0.3 180 0.34   49 1690 10.91   0.3 208 0.33   57 2021 12.77   2.1 171 0.43   72 1199 13.2   0.5 49 0.45   37 1434 12.1   0.4 255 3151   14.4 255 0.3   55 3151 14.4   xumoe kuilleytuka. Cr Min   CT Min Co   0.4 84 0.57   39 2075 10.7   3.8 46 0.4	СКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКГ/Г СУХ.В. С.Г. М.П. С.О. Ni 0.2 169 0.35 1.6 46 1296 9.43 18.8 0.3 180 0.34 1.9 49 1690 10.91 21.9 0.3 208 0.33 1.9 57 2021 12.7 60.2 2.1 171 0.43 3.1 72 1199 13.2 30.9 0.5 49 0.45 2.5 37 1434 12.1 27 0.4 255 0.3 2.9 55 3151 14.4 32.8 жимое кишечника. С.Г. М.П. С.О. Ni 0.4 84 0.57 8.4 0.4 84 0.57 8.4 0.4 1.9 53 2.03 2.9 55 3151 14.4 2.5 37 14.3 2.9 55 3151 14.4 2.5 37 14.3 2.5 37 14.3 2.5 37 14.3 2.5 37 14.3 2.9 57 10.7 2.2 38 46 0.4 1.9	СКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКГ/Г СУХ.В.) В ОРІ СГ МІП СО NI СU 0.2 169 0.35 1.6 25.1 46 1296 9.43 18.8 12.6 0.3 180 0.34 1.9 25.4 49 1690 10.91 21.9 15.1 0.3 208 0.33 1.9 30.9 57 2021 12.7 60.2 18.6 2.1 171 0.43 3.1 13.7 72 1199 13.2 30.9 22.5 0.5 49 0.45 2.5 2.8 37 1434 12.1 27 19.3 0.4 255 0.3 2.9 27.9 55 3151 14.4 32.8 19.9 55 3151 14.4 32.8 19.9 55 3151 14.4 32.8 19.9 55 3151 14.4 32.8 19.9 57 0.3 2.9 27.9 57 0.3 2.9 27.9 57 0.3 2.9 27.9 57 0.4 0.4 0.5 8.4 5.1 0.4 84 0.57 8.4 5.1 0.4 0.57 8.4 5.1 3.8 46 0.4 1.9 5.8	(МКГ/Г СУХ.В.) В ОРГАНИЗМ   СГ Мп СО Ni Си Zn   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32   446 1296 9.43 18.8 12.6 19   0.3 180 0.34 1.9 25.4 41   49 1690 10.91 21.9 30.9 32   0.3 208 0.33 1.9 30.9 32   0.3 208 0.33 1.9 30.9 32   0.3 208 0.33 1.9 30.9 32   0.3 208 0.33 1.9 30.9 32   0.1 1171 0.43 3.1 13.7 76   72 1199 13.2 30.9 22.5 36   0.49 0.45 2.5 2.8 33 33   1434 12.1 27 19.3 60 37   55 3151 <td< th=""><th>(МКГ/Г СУХ.В.) В ОРГАНИЗМАХ МОР   СКИХ МП СО NI СШ АВ   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10   446 1296 9.43 18.8 12.6 19 15   0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11   49 1690 10.91 21.9 15.1 23 16   0.3 208 0.33 1.9 30.9 32 11.5   6.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8   2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8   2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8   2.1 14.4 3.2 3.0 27.5 3.6 34   0.4 255 31.1 37.7 37.8 33 25   3.7 14.4 32.8</th><th>СКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКГ/Г СУХ.В.) В ОРГАНИЗМАХ МОРСКОЙ З   CT Mn CO Ni Cu Zn As Cd   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63   46 1296 9.43 18.8 12.6 19 15 0.11   0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03   49 1690 10.91 21.9 15.1 23 16 0.23   0.3 208 0.33 1.9 30.9 32 11.7 703   49 1690 10.91 21.9 15.1 23 16 0.23   57 2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.3   11 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3   2.1 14 12.7 60.2 25 20 0.79   37 1434 12.1 27 19&lt;</th><th>CKUX ЭЛЕМЕНТОВ (МКГ/Г СУХ.В.) В ОРГАНИЗМАХ МОРСКОЙ ЗВЕЗДЫ (MO   CT Mn CO Ni Cu Zn As Cd Mo   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84   46 1296 9.43 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9   0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34   0.3 180 0.33 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34   0.3 180 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27   0.3 208 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27   1.71 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53   2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.4   2.1 1919 13.2 20.9<!--</th--><th>ских элементов (мкг/г сух.в.) в организмах морской звезды <i>Cfenodis</i>.   Cr Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53   46 1296 9.43 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9 0.05   0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42   1.3 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.04   0.3 199 19.1 25.5 20 0.37 3.4 0.05   171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.34 0.04   257 2021 12.7 60.2 18.6 2.5 20 0.04   37 1434 12.1 2.7 19.3 0.27 0.05   37 1434</th><th>CT Min Colspan="6"&gt;NII CU ZD NIE CI Min CO NI CU ZD AS CG Min AS S S S S S S S S S S S S S S S S S S                                <th colsp<="" th=""><th>CFI MIN Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"</th><th>CT Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag Ba T1 Pb   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.5 0.001 0.06   0.3 188 12.6 19 15.1 23 16 0.23 2.3 0.34 0.42 58 0.001 0.06   0.3 189 12.6 18.6 25 20 0.33 1.3 0.23 0.35 0.05 0.04 0.05   49 1690 1091 21.2 18.6 25 20 0.33 0.35 0.33 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 <td< th=""><th>CFI MI CFI MI C MI C MIX CFI MI CF MIX CFI AS CFI MIX &lt;th colspan="1&lt;/th&gt;<th>CFI MIN CO NI CU ZN AS Cd MO Ag Ba TI Pb BI Th U2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 963 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06 0.01 0.02 46 1296 943 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9 0.05 338 0.27 6.7 0.09 6.79 0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42 5.8 0.004 0.05 0.01 0.02 49 1690 1091 21.9 15.1 23 1.6 0.23 2.7 0.04 272 0.25 6.6 0.10 5.22 0.3 208 0.33 1.9 309 32 11.5 8.8 0.27 0.6 6.8 0.003 0.04 0.01 0.02 57 2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.37 3.4 0.05 311 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 1199 13.2 30.9 22.5 36 19 0.26 2.1 0.04 347 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.5 49 0.45 2.5 2.8 33 2.5 0.79 0.27 0.02 9.2 0.003 0.83 0.01 0.02 53 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.4 255 0.3 2.9 279 47 16 8.96 0.2 1.107 8.6 0.009 0.05 0.01 0.29 53 1351 14.4 32.8 199 24 31 0.35 5 0.02 244 0.34 6.9 0.12 4.34 AMMORIMINITALINE ANTICLENTIAL AN</th></th></td<></th></th></th></th></td<>	(МКГ/Г СУХ.В.) В ОРГАНИЗМАХ МОР   СКИХ МП СО NI СШ АВ   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10   446 1296 9.43 18.8 12.6 19 15   0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11   49 1690 10.91 21.9 15.1 23 16   0.3 208 0.33 1.9 30.9 32 11.5   6.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8   2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8   2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8   2.1 14.4 3.2 3.0 27.5 3.6 34   0.4 255 31.1 37.7 37.8 33 25   3.7 14.4 32.8	СКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКГ/Г СУХ.В.) В ОРГАНИЗМАХ МОРСКОЙ З   CT Mn CO Ni Cu Zn As Cd   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63   46 1296 9.43 18.8 12.6 19 15 0.11   0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03   49 1690 10.91 21.9 15.1 23 16 0.23   0.3 208 0.33 1.9 30.9 32 11.7 703   49 1690 10.91 21.9 15.1 23 16 0.23   57 2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.3   11 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3   2.1 14 12.7 60.2 25 20 0.79   37 1434 12.1 27 19<	CKUX ЭЛЕМЕНТОВ (МКГ/Г СУХ.В.) В ОРГАНИЗМАХ МОРСКОЙ ЗВЕЗДЫ (MO   CT Mn CO Ni Cu Zn As Cd Mo   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84   46 1296 9.43 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9   0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34   0.3 180 0.33 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34   0.3 180 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27   0.3 208 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27   1.71 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53   2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.4   2.1 1919 13.2 20.9 </th <th>ских элементов (мкг/г сух.в.) в организмах морской звезды <i>Cfenodis</i>.   Cr Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53   46 1296 9.43 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9 0.05   0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42   1.3 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.04   0.3 199 19.1 25.5 20 0.37 3.4 0.05   171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.34 0.04   257 2021 12.7 60.2 18.6 2.5 20 0.04   37 1434 12.1 2.7 19.3 0.27 0.05   37 1434</th> <th>CT Min Colspan="6"&gt;NII CU ZD NIE CI Min CO NI CU ZD AS CG Min AS S S S S S S S S S S S S S S S S S S                                <th colsp<="" th=""><th>CFI MIN Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"</th><th>CT Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag Ba T1 Pb   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.5 0.001 0.06   0.3 188 12.6 19 15.1 23 16 0.23 2.3 0.34 0.42 58 0.001 0.06   0.3 189 12.6 18.6 25 20 0.33 1.3 0.23 0.35 0.05 0.04 0.05   49 1690 1091 21.2 18.6 25 20 0.33 0.35 0.33 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 <td< th=""><th>CFI MI CFI MI C MI C MIX CFI MI CF MIX CFI AS CFI MIX &lt;th colspan="1&lt;/th&gt;<th>CFI MIN CO NI CU ZN AS Cd MO Ag Ba TI Pb BI Th U2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 963 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06 0.01 0.02 46 1296 943 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9 0.05 338 0.27 6.7 0.09 6.79 0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42 5.8 0.004 0.05 0.01 0.02 49 1690 1091 21.9 15.1 23 1.6 0.23 2.7 0.04 272 0.25 6.6 0.10 5.22 0.3 208 0.33 1.9 309 32 11.5 8.8 0.27 0.6 6.8 0.003 0.04 0.01 0.02 57 2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.37 3.4 0.05 311 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 1199 13.2 30.9 22.5 36 19 0.26 2.1 0.04 347 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.5 49 0.45 2.5 2.8 33 2.5 0.79 0.27 0.02 9.2 0.003 0.83 0.01 0.02 53 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.4 255 0.3 2.9 279 47 16 8.96 0.2 1.107 8.6 0.009 0.05 0.01 0.29 53 1351 14.4 32.8 199 24 31 0.35 5 0.02 244 0.34 6.9 0.12 4.34 AMMORIMINITALINE ANTICLENTIAL AN</th></th></td<></th></th></th>	ских элементов (мкг/г сух.в.) в организмах морской звезды <i>Cfenodis</i> .   Cr Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53   46 1296 9.43 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9 0.05   0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42   1.3 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.04   0.3 199 19.1 25.5 20 0.37 3.4 0.05   171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.34 0.04   257 2021 12.7 60.2 18.6 2.5 20 0.04   37 1434 12.1 2.7 19.3 0.27 0.05   37 1434	CT Min Colspan="6">NII CU ZD NIE CI Min CO NI CU ZD AS CG Min AS S S S S S S S S S S S S S S S S S S <th colsp<="" th=""><th>CFI MIN Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"</th><th>CT Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag Ba T1 Pb   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.5 0.001 0.06   0.3 188 12.6 19 15.1 23 16 0.23 2.3 0.34 0.42 58 0.001 0.06   0.3 189 12.6 18.6 25 20 0.33 1.3 0.23 0.35 0.05 0.04 0.05   49 1690 1091 21.2 18.6 25 20 0.33 0.35 0.33 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 <td< th=""><th>CFI MI CFI MI C MI C MIX CFI MI CF MIX CFI AS CFI MIX &lt;th colspan="1&lt;/th&gt;<th>CFI MIN CO NI CU ZN AS Cd MO Ag Ba TI Pb BI Th U2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 963 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06 0.01 0.02 46 1296 943 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9 0.05 338 0.27 6.7 0.09 6.79 0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42 5.8 0.004 0.05 0.01 0.02 49 1690 1091 21.9 15.1 23 1.6 0.23 2.7 0.04 272 0.25 6.6 0.10 5.22 0.3 208 0.33 1.9 309 32 11.5 8.8 0.27 0.6 6.8 0.003 0.04 0.01 0.02 57 2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.37 3.4 0.05 311 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 1199 13.2 30.9 22.5 36 19 0.26 2.1 0.04 347 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.5 49 0.45 2.5 2.8 33 2.5 0.79 0.27 0.02 9.2 0.003 0.83 0.01 0.02 53 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.4 255 0.3 2.9 279 47 16 8.96 0.2 1.107 8.6 0.009 0.05 0.01 0.29 53 1351 14.4 32.8 199 24 31 0.35 5 0.02 244 0.34 6.9 0.12 4.34 AMMORIMINITALINE ANTICLENTIAL AN</th></th></td<></th></th>	<th>CFI MIN Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"&gt;Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"</th> <th>CT Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag Ba T1 Pb   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.5 0.001 0.06   0.3 188 12.6 19 15.1 23 16 0.23 2.3 0.34 0.42 58 0.001 0.06   0.3 189 12.6 18.6 25 20 0.33 1.3 0.23 0.35 0.05 0.04 0.05   49 1690 1091 21.2 18.6 25 20 0.33 0.35 0.33 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 <td< th=""><th>CFI MI CFI MI C MI C MIX CFI MI CF MIX CFI AS CFI MIX &lt;th colspan="1&lt;/th&gt;<th>CFI MIN CO NI CU ZN AS Cd MO Ag Ba TI Pb BI Th U2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 963 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06 0.01 0.02 46 1296 943 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9 0.05 338 0.27 6.7 0.09 6.79 0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42 5.8 0.004 0.05 0.01 0.02 49 1690 1091 21.9 15.1 23 1.6 0.23 2.7 0.04 272 0.25 6.6 0.10 5.22 0.3 208 0.33 1.9 309 32 11.5 8.8 0.27 0.6 6.8 0.003 0.04 0.01 0.02 57 2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.37 3.4 0.05 311 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 1199 13.2 30.9 22.5 36 19 0.26 2.1 0.04 347 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.5 49 0.45 2.5 2.8 33 2.5 0.79 0.27 0.02 9.2 0.003 0.83 0.01 0.02 53 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.4 255 0.3 2.9 279 47 16 8.96 0.2 1.107 8.6 0.009 0.05 0.01 0.29 53 1351 14.4 32.8 199 24 31 0.35 5 0.02 244 0.34 6.9 0.12 4.34 AMMORIMINITALINE ANTICLENTIAL AN</th></th></td<></th>	CFI MIN Colspan="6">Colspan="6">Colspan="6">Colspan="6">Colspan="6">Colspan="6">Colspan="6">Colspan="6">Colspan="6">Colspan="6">Colspan="6">Colspan="6">Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan=""6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"Colspan="6"	CT Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag Ba T1 Pb   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06   0.2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.5 0.001 0.06   0.3 188 12.6 19 15.1 23 16 0.23 2.3 0.34 0.42 58 0.001 0.06   0.3 189 12.6 18.6 25 20 0.33 1.3 0.23 0.35 0.05 0.04 0.05   49 1690 1091 21.2 18.6 25 20 0.33 0.35 0.33 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 0.35 <td< th=""><th>CFI MI CFI MI C MI C MIX CFI MI CF MIX CFI AS CFI MIX &lt;th colspan="1&lt;/th&gt;<th>CFI MIN CO NI CU ZN AS Cd MO Ag Ba TI Pb BI Th U2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 963 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06 0.01 0.02 46 1296 943 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9 0.05 338 0.27 6.7 0.09 6.79 0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42 5.8 0.004 0.05 0.01 0.02 49 1690 1091 21.9 15.1 23 1.6 0.23 2.7 0.04 272 0.25 6.6 0.10 5.22 0.3 208 0.33 1.9 309 32 11.5 8.8 0.27 0.6 6.8 0.003 0.04 0.01 0.02 57 2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.37 3.4 0.05 311 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 1199 13.2 30.9 22.5 36 19 0.26 2.1 0.04 347 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.5 49 0.45 2.5 2.8 33 2.5 0.79 0.27 0.02 9.2 0.003 0.83 0.01 0.02 53 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.4 255 0.3 2.9 279 47 16 8.96 0.2 1.107 8.6 0.009 0.05 0.01 0.29 53 1351 14.4 32.8 199 24 31 0.35 5 0.02 244 0.34 6.9 0.12 4.34 AMMORIMINITALINE ANTICLENTIAL AN</th></th></td<>	CFI MI CFI MI C MI C MIX CFI MI CF MIX CFI AS CFI MIX <th colspan="1</th> <th>CFI MIN CO NI CU ZN AS Cd MO Ag Ba TI Pb BI Th U2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 963 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06 0.01 0.02 46 1296 943 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9 0.05 338 0.27 6.7 0.09 6.79 0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42 5.8 0.004 0.05 0.01 0.02 49 1690 1091 21.9 15.1 23 1.6 0.23 2.7 0.04 272 0.25 6.6 0.10 5.22 0.3 208 0.33 1.9 309 32 11.5 8.8 0.27 0.6 6.8 0.003 0.04 0.01 0.02 57 2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.37 3.4 0.05 311 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 1199 13.2 30.9 22.5 36 19 0.26 2.1 0.04 347 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.5 49 0.45 2.5 2.8 33 2.5 0.79 0.27 0.02 9.2 0.003 0.83 0.01 0.02 53 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.4 255 0.3 2.9 279 47 16 8.96 0.2 1.107 8.6 0.009 0.05 0.01 0.29 53 1351 14.4 32.8 199 24 31 0.35 5 0.02 244 0.34 6.9 0.12 4.34 AMMORIMINITALINE ANTICLENTIAL AN</th>	CFI MIN CO NI CU ZN AS Cd MO Ag Ba TI Pb BI Th U2 169 0.35 1.6 25.1 32 10 963 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06 0.01 0.02 46 1296 943 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9 0.05 338 0.27 6.7 0.09 6.79 0.3 180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42 5.8 0.004 0.05 0.01 0.02 49 1690 1091 21.9 15.1 23 1.6 0.23 2.7 0.04 272 0.25 6.6 0.10 5.22 0.3 208 0.33 1.9 309 32 11.5 8.8 0.27 0.6 6.8 0.003 0.04 0.01 0.02 57 2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.37 3.4 0.05 311 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 1199 13.2 30.9 22.5 36 19 0.26 2.1 0.04 347 0.29 7.7 0.13 9.11 2.1 171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53 0.13 8.5 0.003 0.36 0.01 0.02 72 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.5 49 0.45 2.5 2.8 33 2.5 0.79 0.27 0.02 9.2 0.003 0.83 0.01 0.02 53 143 12.1 27 19.3 60 34 0.11 1.1 0.04 239 0.28 8.5 0.13 3.91 0.4 255 0.3 2.9 279 47 16 8.96 0.2 1.107 8.6 0.009 0.05 0.01 0.29 53 1351 14.4 32.8 199 24 31 0.35 5 0.02 244 0.34 6.9 0.12 4.34 AMMORIMINITALINE ANTICLENTIAL AN
	ементт Мл 169 1296 180 1690 1690 1690 171 171 1199 49 49 1434 255 255 3151 Мл Мл Мл Мл ементт Аваа 171 1199 49 49 1636 1636 1630 1630 1630 1630 1630 1630	цементов (мкг Мл Со 169 0.35 1296 9.43 180 0.34 1690 10.91 208 0.33 208 0.33 208 0.33 171 0.43 171 0.43 184 0.57 84 0.57 84 0.57 84 0.57	Icement Tob (мкг/г сух.н. Mn Co Ni   169 0.35 1.6   169 0.35 1.6   180 0.34 1.9   180 0.34 1.9   180 0.34 1.9   180 0.34 1.9   180 0.34 1.9   180 0.33 1.9   208 0.33 1.9   208 0.33 1.9   201 12.7 60.2   171 0.43 3.1   171 0.43 3.1   171 0.43 3.1   171 0.43 3.1   171 1.43 3.2.9   3151 14.4 32.8   3151 14.4 32.8   MI Co Ni   84 0.57 8.4   2075 10.7 22.4   46 0.4 1.9	(МКГ/Г СУХ.В.) В Орл   Mn Co Ni Cu   169 0.35 1.6 25.1   1296 9.43 18.8 12.6   180 0.34 1.9 25.4   1690 0.34 1.9 25.4   1690 10.91 21.9 15.1   208 0.33 1.9 30.9   2021 12.7 60.2 18.6   171 0.43 3.1 13.7   1199 13.2 30.9 22.5   49 0.45 2.5 2.8   1434 12.1 27 19.3   2151 14.4 32.8 19.9   3151 14.4 32.8 19.9   3151 14.4 32.8 19.9   3151 14.4 32.8 19.9   3151 14.4 32.8 19.9   3151 14.4 32.8 19.9   3151 14.4 32.8<	(МКГ/Г СУХ.В.) В ОРГАНИЗМ   Mn Co Ni Cu Zn   169 0.35 1.6 25.1 32   1296 9.43 18.8 12.6 19   180 0.34 1.9 25.4 41   1690 10.91 21.9 32.9 32   208 0.33 1.9 30.9 32   201 12.7 60.2 18.6 25   171 0.43 3.1 13.7 76   171 0.43 3.1 13.7 76   171 0.43 3.1 13.7 76   171 0.43 3.1 13.7 76   1434 12.1 27 19.3 60   255 0.3 2.9 27.9 27   1434 12.1 27 19.3 60   255 0.3 2.9 27 36   3151 14.4 32.8 19.9	(МКГ/Г СУХ.В.) В ОРГАНИЗМАХ МОР   Мп Co Ni Cu As   169 0.35 1.6 25.1 32 10   1296 9.43 18.8 12.6 19 15   180 0.34 1.9 25.4 41 11   1690 10.91 21.9 15.1 23 16   208 0.33 1.9 30.9 32 11.5   201 12.7 60.2 18.6 25 20   2021 12.7 60.2 18.6 3.8 11.5   171 0.43 3.1 13.7 76 3.8   171 0.43 3.1 13.7 76 3.8   173 20.9 22.5 36 19 16   49 0.45 2.5 28 31 16   3151 14.4 32.8 19.9 24 31   3151 14.4 32.8 19.9	МП СО NI СП А СП   MI CO NI CU Zn As Cd   169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63   180 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63   180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03   180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03   180 0.34 1.9 30.9 32 11.5 8.8   2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.37   171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3   171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3   171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3   173 19.3 30.9 22.5 3.6 9 0.26   193 0.47	Ми Со Ni Cu Zn As Cd Mo   Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo   169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84   1296 9.43 18.8 12.6 19 15 0.11 2.9   180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34   180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34   180 0.34 1.9 30.9 32 115 8.8 0.27   208 0.33 1.9 30.9 32 115 8.8 0.27   2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.37 3.4   171 0.43 3.1 13.7 76 3.8 13.3 0.53   1199 13.2 30.9 25 36 9 0.26 2.1   49 0.45 2.5 28 13.3 0.25 3.4 1.1 <td>(MKT/T CYX.B.) B OPTAHHI3MAX MODCKOЙ 3BC3TLA C<i>ternodix</i>   Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag   169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53   180 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53   180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42   1690 10.91 21.9 15.1 23 16 0.23 2.7 0.04   208 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.04   208 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.04   211 0.43 31 13.7 76 3.8 13.4 0.05   171 0.43 31 13.7 76 3.8 0.27 0.04   1199 13.2 30.9 32.8&lt;</td> <td>(MKT/T Cyx.B.) B OPTAHNI3MAX MODCKOÑ 3BE3JLIA Cremodiscus crisplementarial conditions crisplementarial crisplement</td> <td>(MKT/T CYX.B.) B OPTAHITAMAX MODECKOЙT SHEATLIFY CFM MKT/T CYX.B.) B OPTAHITAMAX MODECKOЙT SHEATLIFY CFM MISCULE STEPATURS   MIn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag Ba T1   169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.3 0.001   180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42 5.8 0.004   180 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.04 272 0.25   208 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.04 37 0.35   2021 12.7 60.2 18.6 25 36 19 0.27 0.05 311 0.29   2119 13.7 76 3.8 0.37 3.4 0.05 311 0.29   171 0.43 37 0.56 31 0.05</td> <td>(мкг/г сух.в.) в ортанизмах морской звезлы <i>Сtenodiscus crispatus</i>   Мп Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag Ba Tl Pb   169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06   1296 9.43 1.8 1.2.6 19 15 0.11 2.9 0.05 338 0.27 6.7   1296 9.43 1.8 1.2.6 19 15 0.11 2.9 0.05 338 0.27 6.7   180 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.05 338 0.35 6.6   2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.35 0.13 0.35 0.35 6.6   2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.35 0.35 0.35 0.35   1199 13.2 31</td> <td>(MKT/T CyX.B.) B OPTAHITAMAX MOPCKOЙ ЗВЕЗЛІА <i>Ctenodiscus crispatus</i>   Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag Ba T1 Pb Bi   169 0.35 1.6 25.1 32 10 963 0.84 0.53 5.3 0.001 0.06 0.01   1296 9.43 18.8 1.26 19 15 0.11 2.9 0.05 3.38 0.27 6.7 0.09   1800 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42 5.8 0.004 0.05 0.01   1800 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.05 0.04 0.05 0.01   1901 12.7 60.2 18.6 23 0.34 0.02 0.01 0.01   1991 12.7 60.2 31 0.25 24 0.1 0.01 0.05 0.01</td> <td>Important of the sector of the secto</td>	(MKT/T CYX.B.) B OPTAHHI3MAX MODCKOЙ 3BC3TLA C <i>ternodix</i> Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag   169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53   180 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53   180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42   1690 10.91 21.9 15.1 23 16 0.23 2.7 0.04   208 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.04   208 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.04   211 0.43 31 13.7 76 3.8 13.4 0.05   171 0.43 31 13.7 76 3.8 0.27 0.04   1199 13.2 30.9 32.8<	(MKT/T Cyx.B.) B OPTAHNI3MAX MODCKOÑ 3BE3JLIA Cremodiscus crisplementarial conditions crisplementarial crisplement	(MKT/T CYX.B.) B OPTAHITAMAX MODECKOЙT SHEATLIFY CFM MKT/T CYX.B.) B OPTAHITAMAX MODECKOЙT SHEATLIFY CFM MISCULE STEPATURS   MIn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag Ba T1   169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.3 0.001   180 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42 5.8 0.004   180 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.04 272 0.25   208 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.04 37 0.35   2021 12.7 60.2 18.6 25 36 19 0.27 0.05 311 0.29   2119 13.7 76 3.8 0.37 3.4 0.05 311 0.29   171 0.43 37 0.56 31 0.05	(мкг/г сух.в.) в ортанизмах морской звезлы <i>Сtenodiscus crispatus</i> Мп Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag Ba Tl Pb   169 0.35 1.6 25.1 32 10 9.63 0.84 0.53 6.3 0.001 0.06   1296 9.43 1.8 1.2.6 19 15 0.11 2.9 0.05 338 0.27 6.7   1296 9.43 1.8 1.2.6 19 15 0.11 2.9 0.05 338 0.27 6.7   180 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.05 338 0.35 6.6   2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.35 0.13 0.35 0.35 6.6   2021 12.7 60.2 18.6 25 20 0.35 0.35 0.35 0.35   1199 13.2 31	(MKT/T CyX.B.) B OPTAHITAMAX MOPCKOЙ ЗВЕЗЛІА <i>Ctenodiscus crispatus</i> Mn Co Ni Cu Zn As Cd Mo Ag Ba T1 Pb Bi   169 0.35 1.6 25.1 32 10 963 0.84 0.53 5.3 0.001 0.06 0.01   1296 9.43 18.8 1.26 19 15 0.11 2.9 0.05 3.38 0.27 6.7 0.09   1800 0.34 1.9 25.4 41 11 7.03 0.34 0.42 5.8 0.004 0.05 0.01   1800 0.33 1.9 30.9 32 11.5 8.8 0.27 0.05 0.04 0.05 0.01   1901 12.7 60.2 18.6 23 0.34 0.02 0.01 0.01   1991 12.7 60.2 31 0.25 24 0.1 0.01 0.05 0.01	Important of the sector of the secto	

*Примечание.* 1 – тело без кишечника, 2 – содержимое кишечника.

23

1.4

0.13 6.72

6.8

0.28

0.08 313

0.6

0.54

Π

38

6.81 15.0 13.3

259

35

82

3006

12.6

2

Элементный состав донных осадков представлен в табл. 10.

По порядку десятичных величин среднее содержание Ti, Cr, Cu, Zn и Ba не показывает существенных различий между осадками метанового высачивания и фоновыми, а также верхней континентальной корой. При этом среднее содержание Mn, Cr, Co, Ni, Pb, Zn и As в фоновых осадках на 20–50% превышает таковое на полях метанового высачивания.

Для количественной оценки обогащения осадков химическими элементами относительно верхней части континентальной коры (UCC) обычно используется фактор обогащения  $EF_x$  [43]. Он рассчитывается по формуле  $EF_x = (C_x/C_{Al})_{ocaлок}/(C_x/C_{Al})_{UCC}$ , где  $C_x$  и  $C_{Al}$  — содержание элемента x и Al в изучаемых пробах и в верхней части континентальной коры соответственно [41] (см. табл. 10). Величина  $EF_x < 1$  означает отсутствие обогащения (или обеднение),  $EF_x$  1–3 показывает заметное и  $EF_x > 3$  — значимое обогащение исследуемых осадков [19]. Можно видеть, что на метановых полях и на фоновых станциях значения  $EF_x$  для Ti, Cr, Ni, Cu и Ba не превышают 1, для Zn и Pb чуть больше 1 (1.25 и 1.5 соответственно) (рис. 7).

#### **ДИСКУССИЯ**

Морские беспозвоночные поглощают микроэлементы из воды и пищи через проницаемые мембраны, концентрируясь в тканях организма, фиксируясь в биоминеральной структуре экзоскелетов и/или адсорбируясь на них [32, 35]. На биоаккумуляцию металлов влияют как биотические (видовая специфика, возраст, репродуктивное состояние и др.), так и абиотические факторы (концентрации элементов и формы их нахождения в биотопе, окислительно-восстановительные свойства осадков, соленость и температура воды) [23, 32, 40]. Биодоступность химических элементов связана с их усвояемой формой, способной связываться с покровом организма, жаберным эпителием, эпителием кишечника и клеточной мембраной, вызывая тем самым различные биологические реакции; биодоступность металлов для донных организмов возрастает по мере увеличения содержания их лабильных форм нахождения во вмещающих осадках [26, 39].

Рассматриваемые в данной работе микроэлементы, в первую очередь Mn, Zn, Co, Ni, Cu, Mo, являются ключевыми в химической структуре металлоэнзимов и коферментов, катализирующих важные метаболические процессы (синтез хлорофилла, перенос электронов во время дыхания. лизис клеток, ферментативная леятельность и т.д.) [24, 38]. Однако при превышении определенных пороговых концентраций в биотопе эти микроэлементы могут оказывать токсичное воздействие на организмы. Другая группа микроэлементов (As, Cd, Pb, Bi, Tl, Th, U) относится к числу потенциально токсичных, содержание которых регламентируется протоколами качества компонентов экосистемы (воды, грунтов и морепродуктов) [27]. Распределение 19 элементов в Bivalvia, Ophiuroidea, Asteroidea, Holothuroidea показали значительную вариабельность концентраций (см. табл. 4–7). Исследуемые элементы могут быть разделены на четыре группы по уровню их концентраций в организмах (мкг/г сух. B.): 1) Mn, Ti, Ni, Cu, Zn, Ba, As (10–100); 2) V, Co, Cd, Mo, Pb (1–10); 3) Cr, Sc, Th, U (0.1–1); 4) Tl, Bi (0.01-0.1). Следует отметить изменчивость концентрации одного и того же элемента в разных таксонах, что отражает, по-видимому, разные способности организмов к усвоению тех или иных форм нахождения элементов, то есть определяется степенью их биодоступности. От-



Рис. 7. Сравнение среднего фактора обогащения EF<sub>x</sub> осадков для метановых полей и фоновых станций.

		Ckapo/ June Po						
Станция	Род, вид		Объе	кт анализа		$C_{opr}, \%$		скарб, %
2172		Мягі	кие ткани			42.38		1.08
C10C	BIVAIVIA FORMANA ARCHCA	Рако	вина			2.2		10.5
603		Мягі	кие ткани			37.80		2.56
5700	BIVAIVIA DIMILIPECTEN Greenlanaicus	Рако	вина			2.90		11.64
5623	Ohiuroidea Ophiocten sericeum	Тело	без кишечни	Ka		10.06		10.72
5624	Ohiuroidea Ophiocten sericeum	Тота.	ЛЬНО			13.20		9.04
5625	Ohiuroidea Ophiocten sericeum	Тота.	ЛЬНО			11.29		9.58
CU33		Тело	без кишечни	Ka		35.15		1.42
C70C	HOIOUIUUIOIUCA Myriorocouis rincki	Соде	сржимое кише	ечника		7.96		0.00
3033	II. a lathannai da a' Mania tura di a dia di i	Тело	без кишечни	Ka		32.40		0.72
C70C	IDOIOUIUIOIUCA Myriorrochus rincki	Соде	сржимое кише	ечника		10.16		0.00
1033		Тело	без кишечни	Ka		18.14		8.61
<b>70</b> 24	Astel oldea Crenoaiscus crispatus	Соде	сржимое кише	ечника		4.07		0.00
3033		Тело	без кишечни	Ka		23.3		6.83
C70C	Aster ordea Crenoaiscus crisparus	Соде	сржимое кише	ечника		4.34		0.00
00033		Тело	без кишечни	Ka		18.85		8.33
7-0600	Asterolaca Crenoalscus crispatus	Соде	ржимое кише	ечника		4.27		0.00
9093		Тело	без кишечни	Ka		7.87		17.25
0000	Aster ordea Crenoaiscus crisparus	Соде	сржимое кише	ечника		3.30		0.00
Таблица 9. Соде донных осадках	ржание основных гранулометрических фракı моря Лаптевых	лий (%), ор <b>г</b>	ганического у	тлерода (С <sub>орг</sub>	) и карбонат	ного углерод	а (С <sub>карб</sub> ) в по	верхностных
					C			
Гпанулом	иетрические фракции С и С (%)		-	-	Станции	-		
for find t	ACT FILL LOCKING P FUNCTION, COPI II CKAPO (/0)	5590-2	5623*	5624	5625*	5635	5636	5953*
Целит (< 2 мкм)		16.30	19.37	21.43	19.34	27.54	16.45	21.83
Алеврит (2-63 м	dKM)	80.72	60.17	77.41	77.34	72.46	76.96	75.46
Песок (63—2000	MKM)	2.99	20.46	1.17	3.32	0.00	6.59	2.68

VITTO CTITO. à h 202 CITT I ç ę а почных -) углерода. .) и карбонатного (С. UNDER COLO (C 0100 Таблина 8. Солержание

> ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 2024 Nº 1

25

0.77 0.00

1.34 0.01

1.27 0.01

0.00

0.81

 $1.2 \\ 0.00$ 

0.670.00

1.40 0.00

*Примечание*. \* – станции с метановыми высачиваниями.

 $C_{\text{kap6}}$  $\mathbf{C}_{\mathrm{opr}}$ 

метим, что токсичные элементы Ag, Bi, Pb, Th, Tl, а также литогенные Sc и Cr, находятся в диапазоне низких концентраций — менее 1 мкг/г сух. в. Для потенциально токсичных элементов Cd (9.2 мкг/г) и As (41 мкг/г) (см. табл. 4) значительное превышение концентрации над предельно допустимым значением 2 мкг/г для обоих элементов [27] установлено в мягких тканях морского гребешка Similipecten greenlandicus на поле метанового высачивания Оден. Однако мы измеряли общее содержание As в организмах, где доля наиболее токсичной неорганической формы Аѕ не превышает 1% [18]. Высокие концентрации кадмия в мягких тканях S. greenlandicus могут быть обусловлены несколькими причинами. Во-первых, в отличие от других таксонов, S. greenlandicus является фильтратором-сестонофагом, поглощающим наиболее биодоступные растворенные элементы и взвешенные микрочастицы из придонной воды, концентрация которых в восстановительных биотопах обычно повышена благодаря диффузионным потокам из осадков. Мы предполагаем, что в придонной воде поля Оден концентрации элементов многократно выше, подобно полям метанового высачивания на Корякском склоне, чем в фоновой морской воде [30]. Кроме того, в жабрах фильтраторов и сестонофагов могут задерживаться сульфидные микрочастицы, образующиеся при сульфатредукции, при этом Cd способен к изоморфному замещению Zn в структуре вюртцита ZnS [51]. Кроме того, Cd заменяет Zn в качестве кофактора фермента карбоангидразы, необходимого для метаболизма организмов [36].

Мягкие ткани Bivalvia, как видно из сопоставления данных табл. 4 и рис. 2, характеризуются наибольшими концентрациями изученных элементов. Коэффициент Kd характеризует накопление элементов в процессе метаболизма в мягких тканях двустворчатых моллюсков относительно их раковин, которые напрямую контактируют с водой биотопа. Для разных элементов значения Kd разные: наиболее высокие значения Kd (>10) определены для Cd, As, Zn, Tl и Bi, наиболее низкие (<2) – для литогенных элементов Sc, Mn и Ba. В мягких тканях Bivalvia P. arctica и S. greenlandicus с метановых полей С-15 и Оден накапливается до десяти раз больше Cd, As, Zn, Tl и Bi, чем в P. arctica из Восточно-Сибирского моря. Аналогичное повышенное накопление металлов в двустворках метановых полей впадины Дерюгина (Охотское море) отмечалось ранее при сравнении с их аналогами из Енисейского залива Карского моря, что обусловливалось различиями в мутности воды, концентрациями микроэлементов и их биодоступных форм в восстановительных и окислительных биотопах [34].

Ткани без содержимого кишечника детритофага офиуры Ophiocten sericeum на поле метановых выходов Оден (ст. 5623) и на континентальном склоне (ст. 5635) существенно обеднены всеми микроэлементами относительно содержимого кишечника (Kd <1). Однако, как и в случае с двустворками. Кd тяжелых металлов Ni. Cu. Zn и Ag в офиурах поля Оден заметно выше, чем в фоновом районе континентального склона (см. рис. 3). В проливе Вилькицкого в тотальных пробах офиур повышены содержания Zn, As, Cd, Ag и U (см. табл. 5). Это может быть обусловлено влиянием антропогенного фактора, который отражается в высоких концентрациях и индексах загрязнения As, Zn, Cd и U в поверхностных донных осадках пролива Вилькицкого [25].

На всех станциях содержимое кишечника грунтоеда морской звезды Ctenodiscus crispatus значительно обогащено большинством исследованных элементов относительно мягкого тела, подобно детритофагу офиуре. Это особенно выражено для литогенных элементов Ti, V, Cr, Mn, Ni, Tl, Bi и Th, у которых Kd <0.1. Тело морской звезды обогащено органическим веществом по сравнению с содержимым кишечника (в среднем 17.1 и 4% Сорг соответственно). Этим можно объяснить повышенные концентрации в теле звезды тяжелых металлов Cu, Zn, Cd и Ag, образующих устойчивые комплексные соединения с органическими лигандами [38]. На метановых полях наибольшие значения Kd показали Ag и Cd (10 и 60 соответственно) (см. рис. 5). В районах вне метановых полей повышенные содержания Mn, Ag, As, Pb и Zn определены в морской звезде из пролива Вилькицкого (ст. 5636) и на континентальном склоне (ст. 5635), что возможно связано с антропогенным влиянием через атмосферный перенос микрочастиц в более глубоководные районы Арктики [2, 17]. Это может быть справедливым не только для Mn, Ag, As, Pb и Zn, но и для литогенных элементов Sc, Ti, V, Cr, Ni, Ba. Pb. Th и U. заметно обогашающих мягкое тело звезды на более глубоководных станциях вне полей метанового высачивания (см. рис. 5).

Как и в случае других исследованных грунтоедов, в содержимом кишечника голотурий *Myriotrochus rincki*, концентрации большинства элементов намного выше, чем в их мягком теле (см. табл. 7 и рис. 6). Исключение составляют Zn, As, Cd и Ag, показывающие заметное обогащение мягких тканей (Kd = 2-3) как на полях Оден и C-15, так и на фоновой станции Восточно-Сибирского моря.

Коэффицент Kd отражает распределение элементов между органической и органо-минеральной составляющими тела донных животных. В этом нас убеждают данные табл. 8: мягкие ткани двустворок обогащены органическим углеродом в 15-20 раз относительно их раковин, а тела морских звезд и голотурий — в 3-5 раз относительно содержимого их кишечников. Мы допускаем, что на повышенную аккумуляцию элементов в мягких тканях (и соответственно более высокие значения Kd), наряду с общим содержанием Сорг, влияет и качественный состав органики в биотопе. По данным [46], органическое вещество в осадках метановых полей имеет облегченный изотопный состав углерода  $\delta^{13}C-CH_4$  (-83.3%), что свидетельствует о его биогенном продуцировании консорциумом архей. По-видимому, на метановых полях, покрытых бактериальными матами, автохтонные соединения Соорг легче усваиваются донными организмами, способствуя повышенному накоплению ряда тяжелых металлов и мышьяка. При этом следует иметь в виду, что значимых различий между содержанием общего Соог в тканях организмов с метановых полей и вне их не отмечается (см. табл. 8). Исключение составляет морская звезда по поле С-15, в теле которой в среднем примерно в полтора раза больше Соог, чем из фонового таксона (23.13 и 15.1% соответственно).

Для исследованных организмов намечается общая тенденция: в двустворках с наиболее высоким содержанием Соор в мягких тканях (в среднем 40%, см. табл. 8), обитающих на метановых полях, фиксируются и высокие значения Kd, особенно для Zn, As, Cd и Tl (10-51). Подобным образом для офиур, морских звезд и голотурий повышенная биоаккумуляция тяжелых металлов Ag, Cu, Mo, Zn, Ni (хотя и со значительно более низкими значениями Kd) также отмечена на метановых полях. В большинстве случаев наименьшее накопление в мягких тканях (Kd <1) таксонов метановых полей показывают преимущественно литогенные элементы Sc, Ti, V, Cr, Mn, Ba, Pb, Th. Остальные элементы примерно пропорционально распределяются между мягкими и твердыми тканями. В соответствии с этим можно выделить две группы микроэлементов. В первую группу входят Ag, As, Cd, Cu, Mo, Ni, Zn и Tl, которые в значительно большей степени накапливаются в мягких тканях, обогащенных Сорг. Большинство из этих элементов способны образовывать комплексные соединения с органическими соединениями. Во вторую группу входят Sc, Ti, V, Cr, Mn, Ba, Pb, Th, это литогенные элементы, Kd которых очень низок в таксонах метановых полей, но повышен на станциях фоновых районов.

Детритофаги и грунтоеды поглощают органические и минеральные частицы из поверхностных донных осадков, а также растворимые формы элементов из иловых вод и бентических диффузионных потоков на границе вода—дно [31], наиболее интенсивных в восстановительных биотопах. В кишечнике грунтоедов как правило преобла-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 1 2024

дают алевритопелитовые частицы мельче 63 мкм [48]. Исследованные нами осадки представлены алевритопелитовыми илами с 16.3-27.54% пелита с преобладанием алевритовой фракции (в среднем более 60%) (см. табл. 9). Это соответствует среднему гранулометрическому составу осадков моря Лаптевых: 22% пелита и 62% алеврита [44]. Незначительное на всех станциях содержание песка (0-6%) оказалось резко повышенным на поле Оден (до 20.46%). По-видимому, этот факт может отрицательно влиять на биоаккумуляцию химических элементов детритофагами и грунтоедами из осадков на поле Оден, поскольку доля пелитовой фракции, как правило, обогашенной органическим веществом и потому наиболее усваиваемой, здесь уменьшена наряду с пониженным содержанием Соорг в осадке (0.67%). Содержание тяжелых металлов и металлоида мышьяка в поверхностных осадках моря Лаптевых (см. табл. 10) соответствуют средним значениям, полученным для большого числа станций в море Лаптевых [44] (мкг/г): Cr 69.11, Ni 33.99, Cu 18.41, Zn 86.0, As 23.85. Сd 0.11 и Pb 24.02.

Низкие коэффициенты обогащения EF<sub>x</sub> осадков большинством элементов, кроме Mn, As и Mo, характерны для метановых полей (см. рис. 8). Аналогичным образом, в восстановленных осадках полей метановых выходов на Корякском склоне Берингова моря также не выявлено обогашение большинством элементов ( $EF_{v} < 1$ ), и лишь незначительные величины EF<sub>x</sub> получены для Мо (2.18) и As (1.45) [30]. В фоновых осадках более высокие значения EF<sub>x</sub> Mn и As можно объяснить повышенным содержанием пелитовой фракции и Соорг по сравнению с осадками метановых выходов (см. табл. 9). Судя по низким значениям фактора обогащения, дополнительное поступление большинства элементов в результате антропогенного влияния в этом районе моря Лаптевых отсутствует. С другой стороны, значимые факторы обогащения EF<sub>x</sub> Mn, As и Mo (от 3 до 10) позволяют предполагать влияние природных процессов диагенетического перераспределения и преобладания в осадках мелкодисперсного вещества, а кроме того, для As — вследствие антропогенного загрязнения. Повышенные по сравнению с доиндустриальным уровнем содержания As, Cr, Ni, Cu, Zn, и Pb установлены в поверхностных донных осадках наиболее глубоких частей (севернее 85° с.ш.) моря Лаптевых; причем предполагается, что обогащение мышьяком (EF<sub>x</sub> 1.9-2.2) имеет преимущественно природное происхождение [44]. Наряду с этим, высокое значение EF, As (4.2) в поверхностных осадках пролива Вилькицкого и его высокое содержание (18 мкг/г) в осадках моря Лаптевых очевидно связано с антропогенным фактором — атмосферным переносом продуктов сжигания торфа и угля, как правило, обогащенных мышьяком, из районов восточной

Сибири [25, 29]. Особенно значимую роль атмосферный перенос и осаждение тяжелых металлов может играть в тех удаленных частях арктических морей, где влияние стока крупнейших сибирских рек незначительно [2].

Сопоставление уровней концентраций элементов в исследованных организмах (см. табл. 4–7) с таковыми в донных осадках (см. табл. 10) показывает, что в осадках они существенно выше, чем в донных организмах. С другой стороны, в содержимом кишечников грунтоедов (морских звезд и голотурий) содержание различных микроэлементов (см. табл. 6 и 7) от 1.5 до 5 раз меньше, чем во вмещающих донных осадках (см. табл. 10). При этом корреляция между осадками и содержимым кишечника для Ті, Сr, V, Ni, Cu, Zn и Ва либо отсутствует, либо она слабая ( $R^2 < 0.3$ ). Это может свидетельствовать о преобладающем нахождении данных элементов в терригенных осадках моря Лаптевых в литогенной форме, мало доступной для усвоения животными. В случае As, Co, Mn, Pb и Мо корреляция между осадками и содержимым кишечника более заметна и значима ( $R^2$  от 0.40 до 0.78), что позволяет предположить преобладание в осадках геохимически лабильных (более биодоступных) форм этих элементов, таких как сорбированный и/или связанный с органикой комплекс. Последнее ранее указывалось для осадков арктических морей [1, 5, 29]. В отличие от микроэлементов, содержимое кишечника детритофагов и грунтоедов с концентрацией Сорг от 3.3 до 10.2% (см. табл. 8) обогащено органикой в 2.5–12.6 раз относительно донных осадков. Это служит количественной характеристикой взаимодействия макрозообентоса с донными осадками. Организмы в процессе метаболизма перерабатывают осадки, обогащая содержимое своих кишечников органическим веществом, которое затем поступает обратно в осадки и также обогащает их.

В осадках метановых полей среднее содержание  $C_{opr}$  (0.75%) оказалось ниже, чем в фоновых (1.35%) (см. табл. 9). Это подтверждает литературные данные о пониженном среднем содержании в осадках  $C_{opr}$  (0.5 и 0.81%) по сравнению с фоном (1.25%), что обусловлено процессами метанокисления и сульфатредукции, которые активизируют разложение аллохтонного и автохтонного органического вещества [46].

Для количественной оценки накопления элементов биотой авторами предложено использовать биоаккумуляционный потенциал (БП) [3], который характеризует главное свойство живого вещества — продуцирование биомассы. БП оценивает способность организмов аккумулировать элементы, исходя из их содержания в целом организме, умноженном на его биомассу; он рассчитывается по формуле: БП =  $C_{3лем}(MкГ/\Gamma) \times$ × Биомасса (г/м<sup>2</sup> биотопа). Принимая во внимание, что функционирование макробентоса влияет на трансформацию органического вещества в осадках, мы рассчитали БП наиболее массовых бентосных организмов Bivalvia и Ophiuroidea на полях метановых высачиваний и фоновых станций не только для микроэлементов, но и для  $C_{opr}$  (табл. 11).

Данные по биомассе этих животных, поднятых со дна дночерпателем Ван-Вина, взяты из работы [49]. Согласно этим данным, на поле С-15 биомасса *Portlandia arctica* составляет 0.7  $\Gamma/M^2$ , *Ophiocten sericeum* -7.2 г/м<sup>2</sup>, а на фоновой станции 5624 биомасса O. sericeum в десять раз меньше  $(0.6 \ \Gamma/M^2)$ . На метановом поле C-15 O. sericeum обладает значительно большим БП по сравнению с *P. arctica* для всех элементов (см. табл. 11). При этом офиуры аккумулируют каждый из микроэлементов на поле С-15 значительно больше (до 40 раз), чем на фоновой станции. Среди элементов значения БП варьируют в широких пределах: 5–288 мкг/м<sup>2</sup> для Ni, As, Ba, Cu, Ti, V, Mn и Zn. Максимальный БП опрелелен лля цинка (до 300 мкг/м<sup>2</sup>). Для остальных элементов, в том числе токсичных Ag, Cd, Pb, Bi, Th и U, БП значительно более низкий — от < 0.01 до 2 мкг/м<sup>2</sup>.

Биоаккумуляция органического углерода двустворчатыми моллюсками и офиурами в сотни и тысячи раз выше, чем микроэлементов (см. табл. 11). На метановом поле C-15 в соответствии с почти двукратным превышением среднего содержания  $C_{opr}$  в тотальной пробе офиур (12.15%) над таковым в двустворках (6.22%, см. табл. 8), БП офиур составляет 0.72 г  $C_{opr}/M^2$ , двустворок — 0.44 г  $C_{opr}/M^2$ . На фоновой станции 5624 офиуры накапливают существенно меньшее количество  $C_{opr}$  в своей биомассе — 0.08 г  $C_{opr}/M^2$ . Эти данные позволяют оценить роль бентосных организмов в аккумуляции органического вещества, а также сделать вывод о важном вкладе донных биосообществ в цикл углерода в арктических морях.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таргетным органом — накопителем большинства изученных элементов являются мягкие ткани Bivalvia *Portlandia arctica* (детритофаг) и Semilipecten greenlandicus (фильтратор-сестонофаг) с высоким содержанием Сорг (38-42%), где концентрации Cd, As, Zn, Tl и Bi в 10-50 выше, чем в раковине. На метановых полях С-15 и Оден повышенные концентрации выявлены элементов в мягких тканях этих двух видов Bivalvia по сравнению с фоновой портландией из Восточно-Сибирского моря. Тело (без кишечника) детритофага Ophiocten sericeum, а также грунтоедов — морской звезды Ctenodiscus crispatus и голотурии Myriotrochus rincki, обеднено большинством

#### БИОАККУМУЛЯЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА 29

Таблица 10. Среднее содержание химических элементов (мкг/г сух.в.) в поверхностных донных осадках моря Лаптевых в сравнении с верхней частью континентальной коры

						Τï	Mr	- 1	V	Cr	Co	_	Υi	Cu	ΠZ	Ba	I	qc	As	Мо
Метановые поля $(n = 3)$						3850	170	0 1	48	52	23		55	25	70	528	~	21	22	7.4
Фоновые станции ( $n = 6$ )						4950	355(	0	17	62	35		<del>1</del> 5	27	95	487		28	38	7.8
Верхняя часть континентал	іьной к	opы (l	JUC)*			3800	770		97	92	17		26	28	67	628		17	4.8	1.1
Примечание. * См. [41].							-													
Таблица 11. Биоаккумуляцис	онный	потен	циал с	ргани	[3MOB]	Bivalvi	а и Ор	hiuroi	idea дл	и орга	юниче	ского	углеро	да и м	ыкроз	пемент	IOB (MI	КТ/M <sup>2</sup> )		
Таксон, станция	$C_{opr.,} \\ \Gamma/M^2$	Sc	Ti	>	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Mo	Ag	Ba	ΤΙ	Pb	Bi	Th	Ŋ
Portlandia arctica, ст. 5947, поле C-15	0.44	0.1	8.4	1.5	0.17	40	0.5	1.61	11.2	11.2	1.82	1.54 (	).36	Н.д.	13.4	0.023	0.08	0.0008	0.07	0.038
Ophiocten sericeum, ст. 5625, поле C-15	0.72	1.15	130	137	3.6	173	2.3	18.7	90	288	35.3	3.24	1.58	0.14	44	0.014	1.22	0.007	0.36	1.7
Ophiocten sericeum, cr. 5624, фон	0.08	0.06	9.7	56	0.18	15	0.1	2.1	6.84	25	4.8	).27	0.1 (	600.(	т С	0.0006	0.03	0.006	0.012	0.14
Ш – 11																				

*Примечание*. Н.д. — нет данных.

элементов относительно содержимого кишечника. При этом, по аналогии с Bivalvia, накопление тяжелых металлов Ag, Cu, Ni и Zn в офиуре, морской звезде и голотурии на метановых полях заметно выше, чем в фоновых районах. Литогенные элементы Sc, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Ba и Th показывают минимальные концентрации в мягких тканях Bivalvia и значительно более высокие в содержимом кишечников детритофагов и грунтоедов.

Влияние биотического фактора проявляется во взаимосвязи между концентрациями Сорг и микроэлементов в тканях организмов. Элементы первой группы (Ag, As, Cd, Cu, Mo, Ni, Zn и Tl) в значительно большей степени накапливаются в мягких тканях, обогащенных Сорг. Соответственно наиболее высокие значения Kd для Zn, As, Cd и Tl фиксируются на метановых полях (10-51). Общим геохимическим свойством большинства этих элементов является их способность образовывать комплексные соединения с органическими лигандами. Во вторую группу входят преимущественно литогенные элементы (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Ba, Pb, Th), значение Kd которых очень низко в организмах на метановых полях, но повышено на станциях фоновых районов.

В донных осадках концентрация большинства элементов существенно выше, чем в исследованных организмах. В кишечниках грунтоедов (морских звезд и голотурий) содержание большинства элементов до 5 раз меньше, чем во вмещающих донных осадках. Слабая корреляция или ее отсутствие между осадками и содержимым кишечников грунтоедов для Ті, Сг, V, Ni, Cu, Zn и Ва может означать их нахождение в литогенной форме, мало доступной для усвоения животными. Напротив, более заметная и значимая корреляция в случае As, Mo, Pb, Mn и Co позволяет предположить преобладание в осадках более биодоступных форм этих элементов, таких как сорбированные и связанные с органическим веществом. Кроме того, преобладание в осадках бактериогенного Сорг, произведенного археями в процессах анаэробного окисления метана и сульфатредукции на метановых полях моря Лаптевых [46] и обладающего большей питательной ценностью, может способствовать повышенной биодоступности органики и соответственно повышенному накоплению элементов на полях Оден и С-15 по сравнению с фоновыми станциями.

Установленное нами впервые значительное превышение концентрации С<sub>орг</sub> в содержимом кишечника относительно донных осадков свидетельствует о важной седиментологической функции детритофагов и грунтоедов. Биохимическая переработка осадков организмами приводит к обогащению содержимого кишечника органическим веществом, которое затем возвращается в осадки. Очевидно, в этом состоит вклад организмов в биогеохимические циклы на дне моря Лаптевых.

Оценка биоаккумуляционного потенциала (БП) массовых таксонов Portlandia arctica и Ophiocten sericeum, который учитывает основное свойство живого вещества — способность к биопродуцированию — показала следующее. На метановом поле С-15 в соответствии с содержанием элементов в целом теле и биомассой таксонов, популяция офиур аккумулирует каждый из микроэлементов многократно (до 40 раз) больше, чем на фоновой станции. При этом офиуры обладают значительно большим БП для всех элементов по сравнению с двустворками. Среди элементов оба таксона демонстрируют наиболее высокую биоаккумуляцию Ni, As, Ba, Cu, Ti, V, Mn и Zn. Наиболее масштабную биоаккумуляцию два упомянутых таксона производят в отношении органического углерода, особенно выраженную на метановом поле С-15. Здесь БП популяции офиур составляет  $0.72 \ \Gamma \ C_{opr}/M^2$  и портландии —  $0.44 \ \Gamma \ C_{opr}/M^2$ , что соответствует почти двукратному превышению среднего содержания Сорг в офиурах (12.15% в среднем) над таковым в портландии. На фоновой ст. 5624 офиуры накапливают существенно меньшее (почти в 10 раз) количество углерода в своей биомассе.

Наши данные позволяют впервые оценить роль бентосных организмов в аккумуляции не только химических элементов, но и органического углерода, а также сделать вывод о важном вкладе морских донных биосообществ в цикл углерода в морях Арктики. Таким образом, в соответствии с учением А.П. Лисицына о биодифференциации осадочного материала, донная фауна даже в суровом море Лаптевых выполняет функцию биологического фильтра, который задерживает и трансформирует химические элементы, включая потенциально токсичные тяжелые металлы.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность Маккавееву П.Н. и Полухину А.А. — за предоставление данных по гидрохимии придонной воды. Мы искренне благодарим Беляева Н.А., Мирошникова А.Ю. за предоставление данных по литологии осадков, Борисова Д.Г. за выполнение гранулометрического анализа и Удалова А.А. за консультацию по биомассе бентосных организмов на полях метановых выходов.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ (тема № FMWE-2024-0020); обработка материала и анализ данных выполнены при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-17-00234-П).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Будько Д.Ф., Демина Л.Л., Лисицын А.П. и др. Формы нахождения тяжелых металлов в современных донных осадках Белого и Баренцева морей // Докл. РАН. 2017. Т. 474. № 1. С. 93–98.
- 2. Виноградова А.А., Котова Е.И. Загрязнение северных морей России тяжелыми металлами: поток из атмосферы и речной сток // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 1. С. 22–32.
- 3. Демина Л.Л., Галкин С.В. Биогеохимия микроэлементов в глубоководных гидротермальных экосистемах. М.: ГЕОС, 2013. 234 с.
- Демина Л.Л., Галкин С.В. Биоаккумуляция микроэлементов в организмах донных биогеоценозов окислительных и восстановительных обстановок океана: сходство и различие // Геохимия. 2018. № 6. С. 572–585.
- 5. Демина Л.Л., Левитан М.А., Политова Н.В. О формах нахождения некоторых тяжелых металлов в донных осадках эстуарных зон рек Оби и Енисея (Карское море) // Геохимия. 2006. № 2. С. 212– 226.
- Куценогий К.П., Куценогий П.К. Комплексный мониторинг атмосферных аэрозолей Сибири // Аэрозоли Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. С. 16–27.
- Лисицын А.П. Основные понятия биогеохимии океана // Биогеохимия океана / Под ред. А.П. Лисицына. М.: Наука, 1983. С. 9–31.
- Лисицын А.П. Биодифференциация вещества в океане и осадочный процесс // Биодифференциация осадочного вещества в морях и океанах. Ростов-на Дону: Изд-во Ростов. Гос. Ун-та, 1986. С. 3–66.
- Лисицын А.П. Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.
- Лисицын А.П. Биофильтры Северного Ледовитого океана // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики. Современное состояние и история развития / Под ред. Х. Кассенс, А.П. Лисицына, Й. Тиде и др. М.: Изд-во Московского ун-та, 2009. С. 31–80.
- 11. Маккавеев П.Н. Отчет отряда биогидрохимии о работе в 69-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» // Экосистемы морей Сибирской Арктики-2017. Научный отчет экспедиции 69-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыщ» в Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море (22 августа — 03 октября 2017 г.). М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2017. Т. 1. С. 143–234.
- 12. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в Арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.

- Сиренко Б.И., Денисенко С.Г., Дойбель Х., Рахор А. Макробентос шельфа моря Лаптевых и прилежащих частей Арктического бассейна // Фауна и экосистемы моря Лаптевых и сопредельных глубоководных участков Арктического бассейна. Ч. 1. Исследования фауны морей / Под ред. Сиренко Б.И. СПб., 2004. Т. 54 (62). С. 28–73.
- 14. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики. Современное состояние и история развития / Под ред. Х. Кассенс, А.П. Лисицына, Й. Тиде и др. М.: Изд-во Московского ун-та, 2009. 357 с.
- 15. Флинт М.В. Отчет начальника экспедиции // Экосистемы морей Сибирской Арктики-2017. Научный отчет экспедиции 69-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыщ» в Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море (22 августа — 03 октября 2017 г.). М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2017. Т. I. С. 1–11.
- 16. Флинт М.В., Поярков С.Г., Римский-Корсаков Н.А., Мирошников А.Ю. Экосистемы морей Сибирской Арктики — 2018 (72 рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // Океанология. 2019. Т. 59. № 3. С. 506–509.
- 17. Шевченко В.П., Виноградова А.А., Лисицын А.П. и др. Атмосферные аэрозоли как источник осадочного вещества и загрязнений в Северном Ледовитом океане // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики. Современное состояние и история развития / Под ред. Х. Кассенс, А.П. Лисицына, Й. Тиде и др. М.: Изд-во Московского ун-та, 2009. С. 150–172.
- 18. *Ab Lah R., Smith J., Savins D. et al.* Investigation of nutritional properties of three species of marine turban snails for human consumption // Food Science and Nutrition. 2017. V. 5. № 1. P. 14–30.
- Algeo T.J., Tribovillard N. Environmental analysis of palaeoceanographic systems based on molybdenumuranium covariation // Chem. Geol. 2009. V. 268. P. 211–225.
- Åström E.K.L., Carroll M.L., Ambrose W.G. et al. Methane cold seeps as biological oases in the high-Arctic deep sea // Limnol. Oceanogr. 2018. V. 63. P. S209–S231.
- Baranov B., Galkin S., Vedenin A. et al. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna // Geo-Mar. Lett. 2020. V. 40. P. 541–557.
- 22. Bogoyavlensky V.I., Kishankov A.N., Kazanin A.V. Evidence of large-scale absence of frozen ground and gas hydrates in the northern part of the East Siberian Arctic shelf (Laptev and East Siberian seas) // Marine and Petroleum Geology. 2022. P. 106050.
- 23. *Brown M.T., Depledge M.H.* Determinants of trace metal concentrations in marine organisms // Metal metabolism in aquatic environments / Eds Langstone W.J. and Bebianno M.J. London: Chapman and Hall, 1998. P. 185–217.

- 24. Bruland K.W., Lohan M.C. Controls of trace metals in sea water. The oceans and marine geochemistry // Treatise on Geochemistry / Eds Holland H.D., Turekian K.K. Amsterdam: Elsevier Pergamon, 2004. V. 6. P. 23–47.
- 25. Budko D.F., Demina L.L., Travkina A.V. et al. The Features of Distribution of Chemical Elements, including Heavy Metals and Cs-137, in Surface Sediments of the Barents, Kara, Laptev and East Siberian Seas // Minerals. 2022. V. 12. 328.
- 26. Chen C.Y., Ward D.M., Williams J.J., Fisher N.S. Metal bioaccumulation by estuarine food webs in New England, USA // J. Mar. Scie. Engineer. 2016. V. 4. № 41.
- Crommentuijn T., Polder M.D., van der Plassche E.J. Maximum Permissible Concentration and negligible concentration for metals, taking background concentration into account. (RIVM Report no. 601501 001). Bilthoven, Netherlands: National Institute of Public Health and the Environment, 1997. 260 p.
- Davis N. The Arctic wasteland: a perspective on Arctic pollution // Polar Record. 1996. V. 32. № 182. P. 237–248.
- Demina L.L., Dara O.M., Aliev R.D. et al. Elemental and mineral composition of the Barents Sea recent and Late Pleistocene–Holocene sediments: a correlation with environmental conditions // Minerals. 2020. V. 10 (593).
- Demina L.L., Galkin S.V., Krylova E.M. et al. Trace metal biogeochemistry in methane seeps on the Koryak slope of the Bering Sea // Deep-Sea Res. II. 2022. V. 206. P. 105219.
- Erickson M.J., Turner C.L., Thibodeaux L.J. Field observation and modeling of dissolved fraction sediment-water exchange coefficients for PCBs in the Hudson River // Envir. Sci. Technol. 2005. V. 39. P. 549–556.
- 32. Fisher N.S., Reinfelder J.R. The trophic transfer of metals in marine systems // Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems / Eds Tessier A., Turner D.R. New York: Wiley, 1995. P. 363–406.
- Gebruk A., Krylova E., Lein A. et al. Methane seep community of the Håkon Mosby mud volcano (the Norwegian Sea): composition and trophic aspects // Sarsia. 2003. V. 88. P. 394–403.
- 34. *Glass J.B., Hang Y., Steele J.A. et al.* Geochemical, metagenomic and metaproteomic insights into trace metal utilization by methane-oxidizing microbial consortia in sulphidic marine sediments // Environ. Microbiol. 2014. V. 16. № 6. P. 1592–1611.
- Langston W.J., Spencer S.K. Biological factors involved in metal concentrations observed in aquatic organisms // Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems / Eds. Tessier A., Turner D.R. New York: Wiley, 1995. P. 407–478.

- 36. Lee J.S., Lee J.H. Influence of acid volatile sulfides and simultaneously extracted metals on the bioavailability and toxicity of a mixture of sediment-associated Cd, Ni, and Zn to polychaetes neanthes arenaceodentata // Sci. Total Environ. 2005. V. 338. P. 229–241.
- 37. Martin J.-M., Guan D.M., Elbaz-Poulishet P. et al. Preliminary assessment of the distribution of some trace elements (As, Cd, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn) in a pristine aquatic environment: the Lena River estuary (Russia) // Marine Chem. 1993. V. 43. № 1–4. P. 185–200.
- Morel F.M.M., Price N.M. The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans // Science. 2003. V. 300. P. 944–947.
- Neff J.M. Ecotoxicology of arsenic in the marine environment // Envir. Toxicol. Chem. 1997. V. 16. № 5. P. 917–927.
- Rainbow P.S. Trace metal bioaccumulation: Models, metabolic availability and toxicity // Environ. Intern. 2007. V. 33. P. 576–582.
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry / Eds Holland H.D., Turekian K.K. Amsterdam: Elsevier Pergamon, 2004. V. 3. P. 1–64.
- Rybakova E., Galkin S., Bergmann T. et al. Density and distribution of megafauna at the Håkon Mosby mud volcano (the Norwegian Sea) based on image analysis // Biogeosciences. 2013. V. 10. P. 3359–3374.
- 43. *Salomons W., Forstner U.* Metals in the Hydrocycle. Berlin/Heidelberg: Springer, 1984. 349 p.
- Sattarova V., Aksentov K., Astakhov A. et al. Trace metals in surface sediments from the Laptev and East Siberian Seas: Levels, enrichment, contamination assessment, and sources // Mar. Pollut. Bullet. 2021. V. 173. P. 112997.
- 45. *Savvichev A.S., Kadnikov V.V., Kravchishina M.D. et al.* Methane as an organic matter source and the trophic basis of a Laptev Sea cold seep microbial community // Geomicrobiology. 2017. V. 35. P. 411–423.
- Savvichev A.S., Rusanov I.I., Kadnikov V.V. et al. Biogeochemical activity of methane-related microbial communities in bottom sediments of cold seeps of the Laptev Sea // Microorganisms. 2023. V. 11 (250).
- 47. Sorokin Y.I., Sorokin P.Y. Plankton and primary production in the Lena River estuary and in the southeastern Laptev Sea // Estuar. Coast. Shelf Sci. 1996. V. 43. № 4. P. 399–418.
- 48. *Tessier A., Campbell P.G.C.* Partitioning of trace metals in sediments: Relationships with bioavailability // Hydrobiologia. 1987. V. 149. P. 43–52.
- 49. Vedenin A.A., Kokarev V.N., Chikina M.V. et al. Fauna associated with shallow-water methane seeps in the Laptev Sea // Peer J. 2020. V. 8. P. e9018.
- 50. Ye L., Cook N.J., Ciobanu C.L. et al. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study // Ore Geol. ReV. 2011. V. 39. № 4. P. 188–217.

# BIOACCUMULATION OF CHEMICAL ELEMENTS AND ORGANIC CARBON IN THE MACROZOOBENTHIC ORGANISMS OF THE LAPTEV SEA

## L. L. Demina<sup>\*</sup>, S. V. Galkin, A. S. Solomatina

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia \*e-mail: l demina@mail.ru

Within the framework of the program "Marine Ecosystems of the Siberian Arctic", based on the materials collected during the 69th and 72nd cruises of the R/V "*Akademik Mstislav Keldysh*", a study of the distribution of a group of chemical elements (As, Ba, Bi, Co, Cr, Cr, Cd, Co, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb, Sc, Ti, Tl, Th, V, U and Zn) and organic carbon in the mass taxa of the Laptev Sea macrozoobenthos in the fields of methane seepage and outside them was carried out. For the first time, the bioaccumulation potential (BP) was quantified, taking into account, along with the concentration of elements in organisms, their biomass. At the C-15 methane field, the population of brittle stars accumulates each of the microelements many times (up to 40 times) more than at the background station. Brittle stars and bivalves show increased BP for Ni, As, Ba, Cu, Ti, V, Mn, and Zn compared to other elements, with brittle stars having significantly higher BP. It is assumed that the increased bioaccumulation of some heavy metals and metalloids in methane seep areas is associated with a greater bioavailability of organic matter in bottom sediments. For organic carbon, the highest BP was established, which is especially expressed in the C-15 methane field. At the background station, taxa accumulate a significantly smaller (by a factor of 10) amount of carbon in their biomass. As a result of the functioning of the ground eaters, bottom sediments are enriched with organic carbon, which may indicate an important contribution of benthic organisms to the carbon cycle in the seas of the Arctic.

Keywords: Laptev Sea, benthic organisms, bioaccumulation, bottom sediments, heavy metals, organic carbon