ISSN 0030-1574

Том 64, Номер 4 Июль - Август 2024

ОКЕАНОЛОГИЯ

НАУКА
1727

СОДЕРЖАНИЕ

Том 64, номер 4, 2024

Морская биология

Фитопланктон Обского эстуария (Карское море) в предзимний период
И. Н. Суханова, М. В. Флинт, А. В. Федоров, А. А. Недоспасов, С. Г. Поярков 561

Особенности распределения черноморского ихтиопланктона
в условиях активизации атмосферных процессов в летний гидрологический сезон 2021 г.
Т. Н. Климова, А. А. Субботин, И. В. Вдодович, Ю. А. Загородняя, Д. А. Забродин 570

Декадные изменения таксоценов Nematoda и Harpacticoida
в заливе Благополучия (Карское море)
Д. В. Кондарь, П. В. Лепихина, Л. А. Гарлицкая,
А. А. Удалов, М. В. Чикина, В. О. Мокиевский 585

Предварительные данные о влиянии глубины на таксоцен нематод
в Восточно-Сибирском море
Д. А. Портнова, Л. А. Гарлицкая 597

Мейобентос островов Кондао (Вьетнам):
различия в структуре таксоценов риф-флета и мангровых зарослей
В. О. Мокиевский, А. В. Чесунов, Д. В. Кондарь,
Л. А. Гарлицкая, Нгуен Динь Ты, Нгуен Тхи Зуан Фыонг 605

Травмированность как индикатор плотности популяции и интенсивности промысла
краба-стригуна опилио (*Chionoecetis opilio*) в Баренцевом море
С. В. Баканев 616

Формирование репродуктивного потенциала камчатского краба
в процессе его акклиматизации в Баренцевом море
С. В. Баканев, Т. В. Шамрай 629

Использование предполагаемых идентификационных “контактных сигналов”
белух *Delphinapterus leucas* для мониторинга их сезонных локальных скоплений:
пилотное исследование
Е. М. Панова, А. В. Агафонов 642

Морская геология

Первая находка вивианита в донных отложениях Карского моря
Н. В. Козина, Л. Е. Рейхард, М. Д. Кравчишина, А. С. Филиппов,
О. М. Дара, Е. А. Новичкова, Л. А. Лозинская, С. В. Сломнюк 653

Изменение состава верхнеплейстоценовых осадков в центре активной
гидротермальной системы (Срединная долина, хребет Хуан де Фука, Тихий океан)
В. Б. Курносов, Ю. И. Коновалов, К. Р. Галин 662

Ритмические структуры песчаного берега и самоорганизация рельефа
И. О. Леонтьев 678

Тюшевский морской палеобассейн (Восточная Камчатка):
особенности строения и развития
Н. В. Цуканов 690

Приборы и методы исследований

Применение гидролокационных комплексов для обнаружения участков газовой разгрузки морского дна
В. И. Каевицер, В. М. Смирнов, И. В. Смольянинов 706

Модифицированная гравитационная грунтовая трубка: преимущества, опыт применения в море
А. Н. Колесник, О. Н. Колесник, С. А. Селютин, А. А. Босин, А. С. Астахов 713

Информация

Исследования лагунных эстуариев о. Вайгач в летнюю межень 2023 г.
И. В. Мискевич, Д. С. Мосеев, А. С. Лохов, Е. И. Котова 724

Газогеохимические исследования внешней акватории залива Петра Великого (Японское море) в 83-м рейсе научно-исследовательского судна “Профессор Гагаринский”
А. В. Яцук, М. А. Бовсун, Р. Б. Шакиров, А. В. Стороженко, В. В. Калинчук, Д. С. Максеев, И. Г. Югай, Е. В. Лифанский, П. Д. Жердев, Р. А. Григоров, Д. А. Швалов, К. И. Аксентов, А. Ю. Лазарюк, Е. И. Ярощук 728

93-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”: геосистемы Западно-Арктического шельфа Евразии в сезон активного развития осенне-зимней конвекции и полярной ночи
М. Д. Кравчишина, А. А. Клювиткин, А. Н. Новигатский, А. Г. Матуль, В. В. Иванов, Д. А. Пестунов, Ю. А. Штабкин, Б. В. Баранов, С. В. Галкин, А. К. Амбросимов, Н. В. Козина, О. Н. Лукьянова, И. А. Немировская 731

Contents

Vol. 64, No. 4, 2024

Marine Biology

Phytoplankton of Ob Estuary (Kara Sea) in the Season Preceding Winter
I. N. Sukhanova, M. V. Flint, A. V. Fedorov, A. A. Nedospasov, S. G. Poyarkov 561

Features of the Distribution of the Black Sea Ichthyoplankton in the Conditions of Activation of Atmospheric Processes in the Summer Hydrological Season of 2021
T. N. Klimova, A. A. Subbotin, I. V. Vdodovich, J. A. Zagorodnyaya, D. A. Zabrodin 570

Декадные изменения таксоценов Nematoda и Harpacticoida в заливе Благополучия (Карское море)
Д. В. Кондарь, П. В. Лепихина, Л. А. Гарлицкая, А. А. Удалов, М. В. Чикина, В. О. Мокиевский 585

Preliminary Data on the Effect of Depth on the Nematode Community in the East Siberian Sea
D. Portnova, L. Garlitska 597

Meiobenthos of Con Dao Islands (Vietnam): Differences in Communities' Structure between reef-flat and mangroves.
V. O. Mokievsky, A. V. Tchesunov, D. V. Kondar, L. A. Garlitska, Nguyen Dinh Tu, Nguyen Thị Xuan Phuong 605

Injuries as an Indicator of the Population Density and Fishing Intensity of Snow Crab (*Chionoecetis opilio*) in the Barents Sea
S. V. Bakanev 616

Features of Reproductive Capacity Development of Red King Crab during its Acclimatization in the Barents Sea
S. V. Bakanev, T. V. Shamray 629

Using presumed identification “contact calls” of beluga whales *Delphinapterus leucas* to monitor their seasonal local aggregations: a pilot study
E. M. Panova, A. V. Agafonov 642

Marine Geology

The First Finding of Vivianite in bottom Sediments of the Kara Sea
N. V. Kozina, L. E. Reykhard, M. D. Kravchishina, A. S. Filippov, O. M. Dara, E. A. Novichkova, L. A. Lozinskaya, S. V. Slomnyuk 653

Changes in the Composition of Upper Pleistocene Sediments in the Center of the Active Hydrothermal System (Middle Valley, Juan de Fuca Ridge, Pacific Ocean)
V. B. Kurnosov, Yu. I. Konovalov, K. R. Galin 662

Rhythmic Patterns of the Sandy Coast and Self-organization of the Relief
I. O. Leont’yev 678

Sea Tyushevska Paleobasin (Eastern Kamchatka): Composition and Development Features
N. V. Tsukanov 690

Instruments and research methods

The Use of Sonar Systems to Detect Areas of Gas Discharge of the Seabed
V. I. Kaevitser, V. M. Smirnov, I. V. Smolyaninov 706

The Modified Gravity Corer: Advantages and Offshore Testing
A. N. Kolesnik, O. N. Kolesnik, S. A. Selyutin, A. A. Bosin, A. S. Astakhov 713

Information

Research of the Lagoon Estuaries of Vaygach Island in a 2023 Summer Low Water Period
I. V. Miskevich, D. S. Moseev, A. S. Lokhov, E. I. Kotova 724

Газогеохимические исследования внешней акватории
залива Петра Великого (Японское море) в 83-м рейсе
научно-исследовательского судна “Профессор Гагаринский”
А. В. Яцук, М. А. Бовсун, Р. Б. Шакиров, А. В. Стороженко, В. В. Калинчук, Д. С. Максеев, И. Г. Югай, Е. В. Лифанский, П. Д. Жердев, Р. А. Григоров, Д. А. Швалов, К. И. Аксентов, А. Ю. Лазарюк, Е. И. Ярощук 728

93th Cruise of the Research Vessel Akademik Mstislav Keldysh: Geosystems
of the Western Eurasian Arctic Shelves in the Season of Active Autumn-winter
Convection and Polar Night
M. D. Kravchishina, A. A. Klyuvitkin, A. N. Novigatsky, A. G. Matul, V. V. Ivanov, D. A. Pestunov, Y. A. Shtabkin, B. V. Baranov, S. V. Galkin, A. K. Ambrosimov, N. V. Kozina, O. N. Lukianova, I. A. Nemirovakaya 731

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 561–569

МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ

УДК 551.465

ФИТОПЛАНКТОН ОБСКОГО ЭСТУАРИЯ (КАРСКОЕ МОРЕ) В ПРЕДЗИМНИЙ ПЕРИОД

© 2024 г. И. Н. Суханова[1], М. В. Флинт[1,*], А. В. Федоров[2], А. А. Недоспасов[1], С. Г. Поярков[1]

[1] Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

[2] Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик, Россия

** e-mail: m_flint@ocean.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2023 г.
После доработки 12.03.2024 г.
Принята к печати 18.03.2024 г.

Материал получен в 92-м рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" в Обском эстуарии и на прилежащем мелководном шельфе, в широтном диапазоне от 72°32.0' до 73°14.5' с. ш. 12–13 октября 2023 г. в период, предшествующий становлению сезонного льда. Эстуарный фронт был хорошо выражен в полях температуры и солености (градиент 0.6 епс/км) и имел квазимеридиональное направление. Резкие границы в распределении биогенных элементов, характерные для Обского эстуария в более ранние сезоны, в исследованный период не наблюдались. Численность и биомасса фитопланктона варьировали от 22×10^3 до 75×10^3 кл/л и от 7.3 до 19.0 мг/м^3 соответственно, что на два–три порядка ниже, чем в июльских и сентябрьских наблюдениях. Основу численности (30–78%) и биомассы (28–80%) фитопланктона повсеместно формировали морские диатомовые водоросли, среди которых доминировали *Fragilariopsis cylindrus*. Численность доминирующих в эстуарном фитоцене в более ранние сезоны пресноводных диатомовых *Aulacoseira* была низкой, вид был встречен только в виде мертвых клеток. Представлена схема, отражающая границы между фитопланктонными сообществами разного состава и количественных характеристик и специфику условий в восточной области широкой внешней части Обского эстуария.

Ключевые слова: Карское море, позднеосенний сезон, Обский эстуарий, эстуарный фронт, мелководный шельф, фитопланктонные сообщества

DOI: 10.31857/S0030157424040019, **EDN:** PSGBRG

ВВЕДЕНИЕ

Области эстуариев крупных сибирских рек играют огромную роль в экосистемах эпиконтинентальных арктических морей. Они представляют собой крупнейшие геохимические барьеры [3, 13], регулирующие через масштабный речной сток взаимодействия в системе континент – арктический морской бассейн [9]. В них благодаря интенсивному взаимодействию речных и морских вод формируются специфические высокоградиентные условия среды, проявляющиеся в распределении гидрофизических и гидрохимических свойств [1, 4, 6, 7, 14, 16–19, 21–24], а также особые геохимические условия и условия осадконакопления и аккумуляции аллохтонного вещества [3, 8, 11]. Эстуарные области населены специфическими планктонными сообществами, с ними связаны границы в широтном распределении массовых видов и высокая локальная биологическая продуктивность [10, 16–19, 21–24, 27]. Все это позволяет рассматривать арктические эстуарии как специфические экосистемы, в которых помимо уникальных структурных и функциональных свойств резко выражена сезонная изменчивость, связанная не только общим ходом сезонных процессов в высоких широтах, но и с сезонными изменениями объема речного стока [12].

Процессы в эстуарных районах имеют огромное значение для Карского моря, поскольку оно принимает в себя самый масштабный в Арктике речной сток. Обь, Енисей и Пясина ежегодно приносят в бассейн ~1100 км^3 пресной воды [25, 26]. При этом в Обском эстуарии при годовом стоке 400 км^3 формируется одна из самых масштабных в арктическом регионе областей взаимодействия речных и морских вод – обская эстуарная фронтальная зона. Высокоградиентные условия среды в Обском эстуарии определяют особенности структуры и функциональных

характеристик планктонных сообществ, которые в последние годы интенсивно изучались [16–18, 20, 22, 23]. Имеющиеся данные характеризуют летнее и осеннее состояние сообществ, при этом ранневесенний сезон при максимальном стоке и сходе льда и осенний период резкого падения стока перед ледоставом оставались не исследованными. При том, что интенсивность речного стока – основной фактор, определяющий условия в эстуарии, это составляет существенный пробел в реконструкции сезонного цикла уникальной экосистемы Обского эстуария.

Характерной особенностью Обского эстуария является то, что резкие изменения свойств среды в нем имеют не только характерный для эстуарных областей широтный характер. В широкой внешней части эстуария отмечена хорошо выраженная широтная изменчивость условий, которая, вероятнее всего, определяется взаимодействием потока речных вод и приливных течений с особенностями рельефа дна и орографии берегов. Такие условия должны, безусловно, сказываться на процессах взаимодействия между речной и морской средой, трансформации вещества, структуре эстуарных сообществ. Работами [6, 14] показано, что восточная область широкой внешней части Обского эстуария характеризуется специфическим гидрохимическим режимом. По материалам, полученным в начале лета, описано и количественно охарактеризовано уникальное для эстуарных районов крупных сибирских рек “цветение” водоросли *Euglena sp.*, строго приуроченное к этой области и указывающее на ее достаточно продолжительную изоляцию [20].

Полученный нами материал позволяет впервые характеризовать фитопланктонные сообщества Обского эстуария (их состав, численность, биомассу и пространственную структуру) в осенний сезон резкого падения стока и, основываясь на характеристиках фитоценозов, оценить специфику условий в восточной области внешней части Обской губы.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ, МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал был собран в 92-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” 12–13 октября 2023 г. во внешней широкой части Обского эстуария и на прилежащем карском шельфе. Съемка из 14 станций охватывала широтный диапазон от 72°32.0' до 73°14.5' с. ш. (рис. 1), глубины на станциях составляли от 11 до 26 м. На станциях выполнены гидрофизические зондирования СТД-зондом SBE-911Plus, 5-литровыми батометрами Нискина комплекса “Розетта”, ассоциированного с зондом, отобраны гидрохимические пробы и пробы для анализа фитопланктона. Пробы отбирали с двух горизонтов: на 0 и между 5 и 10 м. Выбор

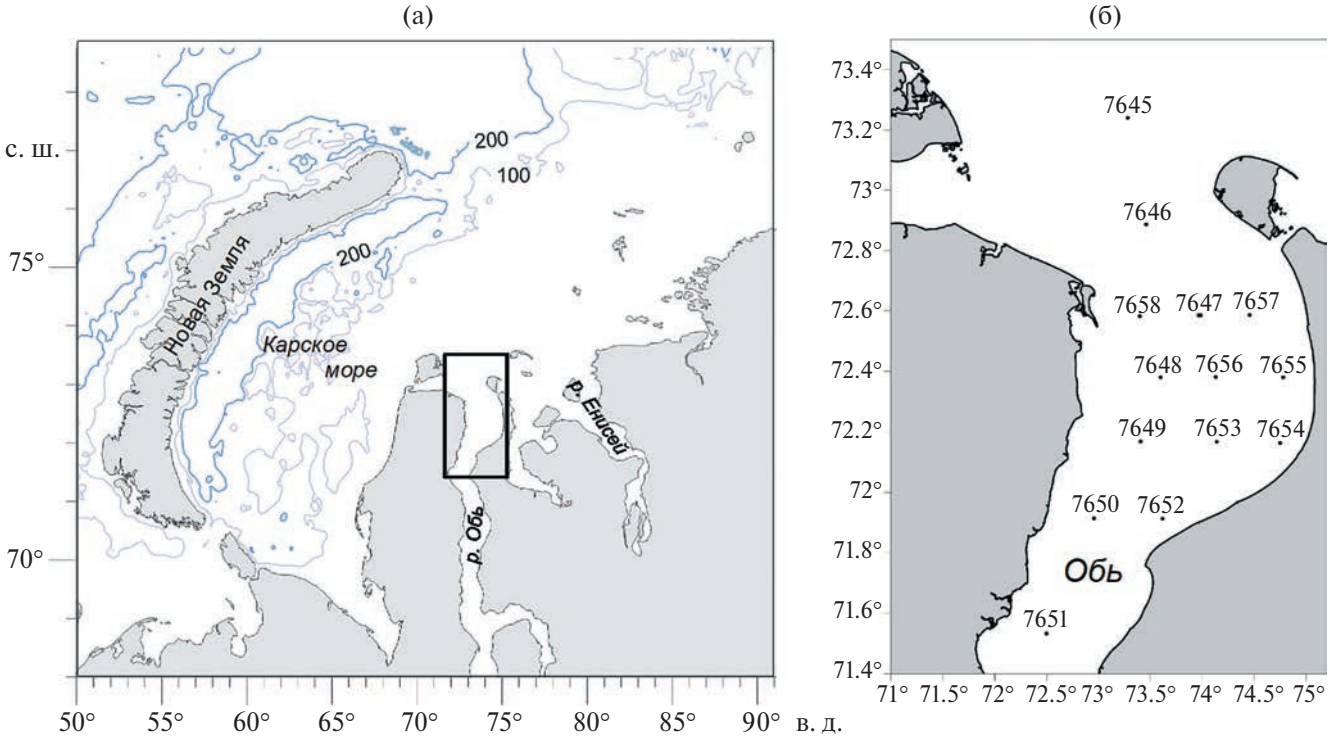

Рис. 1. Положение района исследований (а) и станций в Обском эстуарии, где проведены наблюдения (б).

нижнего горизонта определялся вертикальным распределением температуры, солености и флуоресценции хлорофилла с учетом положения скачка плотности и максимума флуоресценции. Пробы для анализа фитопланктона и сопутствующих гидрохимических определений брали из одних и тех же батометров.

Концентрирование фитопланктона проводили методом мягкой обратной фильтрации 2 л на лавсановых фильтрах с размером ячеи 1 мкм [15]. Все пробы обработаны в не фиксированном живом состоянии в течение 1–2 дней после отбора. До обработки пробы хранили в холодильнике в темноте при температуре 2–3°С. Анализ фитопланктона для определения видового состава, численности и биомассы проводили в камерах Ножотта (объем 0.085 мл) при увеличении ×400 и Наумана (объем 1 мл) при увеличении ×200 с использованием люминесцентных микроскопов Jena Lumar и Leica.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Океанографические условия. Работы проходили в период сезонного снижения стока Оби. На октябрь месяц приходится 7% годового стока Оби, в ноябре он снижается до 4.2% [12]. Сезонное падение объема речного стока и снижение скорости потока вод приводят к увеличению влияния нагонных и приливных течений на свойства среды и структуру фронтальной зоны в эстуарии Оби.

Нашими наблюдениями была охвачена область Обского эстуария, характеризующаяся интенсивным взаимодействием речных и морских вод. Наблюдаемые квазимеридиональные изменения солености в поверхностном слое составляли от 5.3 до 15.8 епс, в придонном – от 8.2 до 31.6 епс, диапазон соответствующих изменений температуры составлял от 4 до 2°С и от 4.5 до < 0°С. Поток идущих на север сильно опресненных обским стоком относительно теплых вод был прижат к западному берегу губы и на нашей съемке прослеживался до ст. 7658. Холодная и относительно соленая вода карского шельфа распространялась на юг в восточной части эстуария. Взаимодействие вод разного происхождения определяло формирование хорошо выраженного эстуарного фронта, имевшего квазимеридиональную ориентацию в поверхностном слое и квазиширотную в придонном (рис. 2). Эстуарный фронт, в сущности, отделял воды, находящиеся под сильным воздействием речного стока, от остальной части Обской губы и характеризовался высокими горизонтальными градиентами солености – до 0.6 епс/км.

На южных станциях 7650 и 7651 опресненной до 5.3–6.6 епс слой занимал верхние 12–13 м и сокращался до 7 м на станциях 7648 и 7649 при возрастании поверхностной солености до 7.0–11.5 епс (рис. 2). Ниже наблюдался галоклин с перепадом солености ~1–2 епс на метр. На ст. 7658, сделанной в области фронтального раздела, верхние 7 м были заняты водой с соленостью 9 епс. Между 7

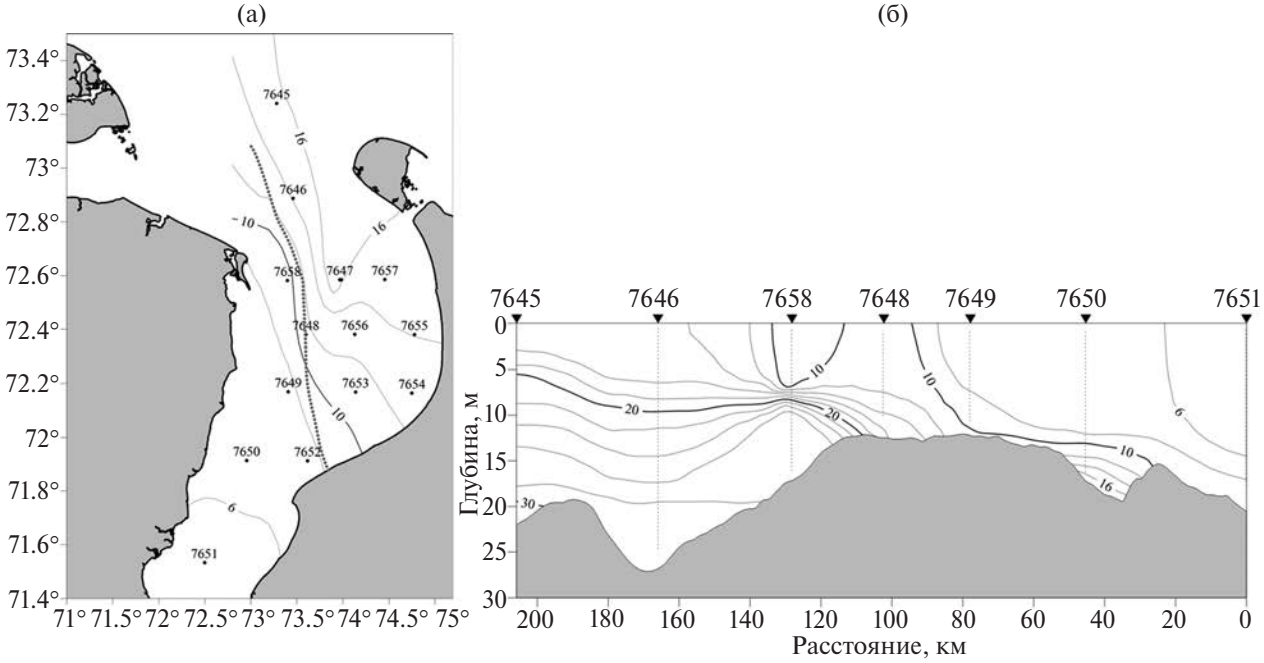

Рис. 2. Распределение поверхностной солености (епс) и положение эстуарного фронта (пунктирная линия) в Обском эстуарии (а), распределение солености на квазимеридиональном разрезе (б).

и 9 м наблюдался резкий термогалоклин с перепадом солености ~10 епс на метр и температуры от 2.9 до 0.5°С (рис. 2б). Прилежащая к эстуарию область мелководного шельфа (станции 7645 и 7646) характеризовались 3–5-метровым верхним перемешенным слоем с соленостью 14–16 епс и плавным увеличением солености до 29–31епс на глубине 22–25 м. Сходные условия наблюдалась на ст. 7647 во внешней области восточной части эстуария. В верхних 8 м соленость составляла 16.6 епс и возрастала до 28 епс на 15 м. Восточная область широкой внешней части широкого Обского эстуария (станции 7653–7657), которую мы образно называем “эстуарным мешком”, при глубине 11–12 м отличалась 9–10-метровым верхним перемешенным слоем с соленостью от 11 до 15 епс. На станциях 7653, 7655 и 7657 в придонном слое соленость резко возрастала до 22–26 епс, что указывало на влияние вод прилежащего шельфа.

Резких границ в распределении биогенных элементов в Обском эстуарии в исследованный период не прослеживалось, содержание нитратов, фосфатов и кремния мало различалось в пределах акватории, по сравнению с летним и раннеосенним сезонами, когда ва области фронта прослеживались их высокие градиенты [6, 14, 16–18, 20]. Концентрация нитратов в верхних 10 м колебалось от 2.6 до 4.2 мкМ, фосфатов от 0.94 до 1.3 мкМ, кремния от 44.4 до 60.6 мкМ. Такие концентрации не ограничивают развитие фитопланктона.

Фитопланктонное сообщество. В период наших исследований в середине октября общие численность и биомасса фитопланктона были на два–три порядка ниже, чем в сентябре 2007 г. и в июле 2016 г. [16–18] и варьировали в пределах, соответственно, от 22×10^3 до 75×10^3 кл/л и от 7.3 до 19.0 мг/м^3 (табл. 1, рис. 3). Максимальные численность и биомасса водорослей были отмечены на ст. 7658 в области эстуарного фронтального раздела.

На южных станциях съемки (7650 и 7651), в области наиболее низкой солености (5.3–6.8 епс) в фитопланктоне по численности и биомассе доминировал морской неритический вид

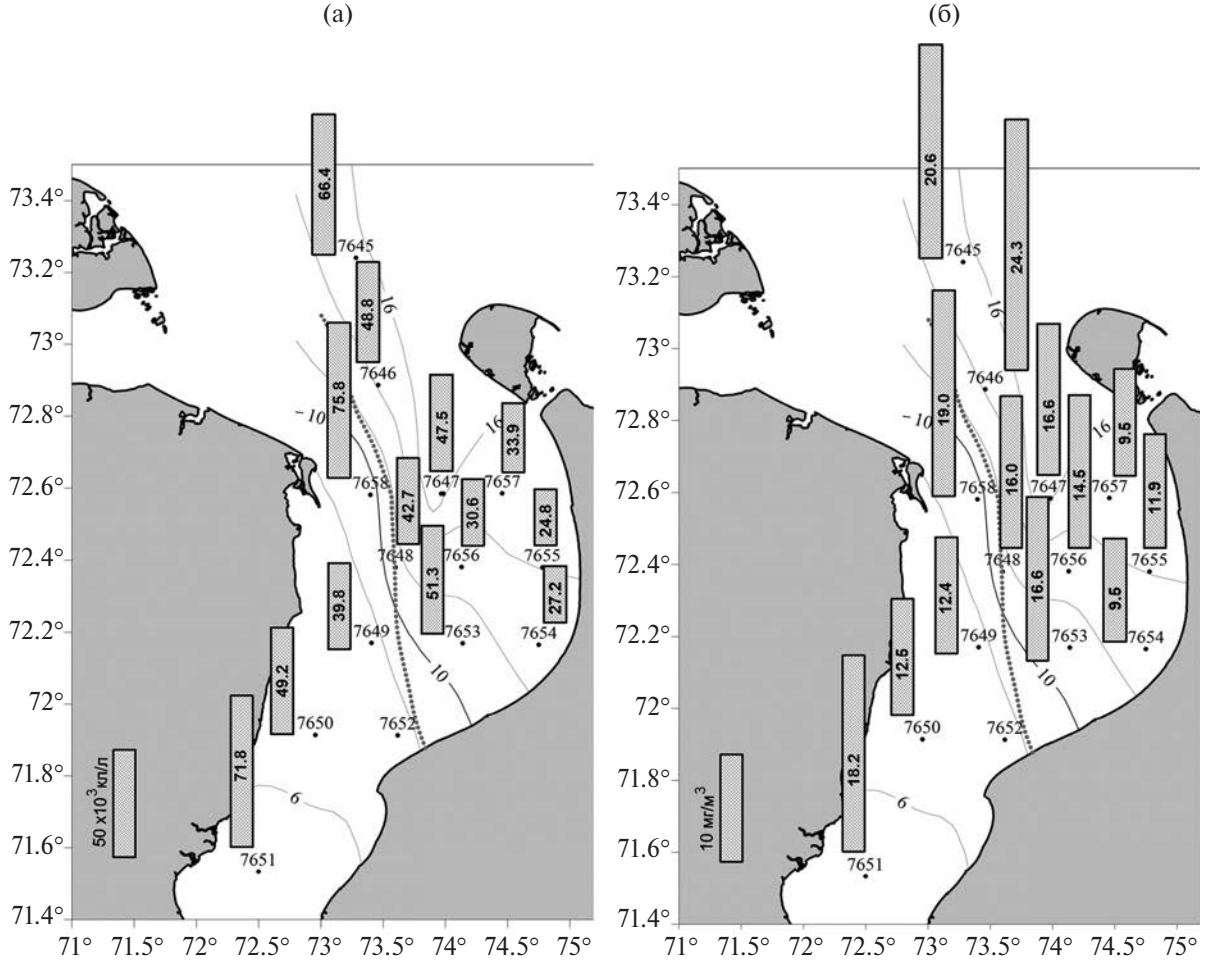

Рис. 3. Распределение численности, $N\times10^3$ кл/л (а) и биомассы, мг/м^3 (б) на фоне распределения поверхностной солености в Обском эстуарии. Оценки не включают мертвые клетки видов рода *Aulacoseira*.

Таблица 1. Температура (T, °C), соленость (S, епс), численность ($N\times10^3$ кл/л) и биомасса (B, мг/м^3) фитопланктона на станциях в Обском эстуарии

№ станции, $Гл_м$	Глот	T	S	N					B				
				D	P	Cr	Rest	Tot	D	P	Cr	Rest	Tot
7645	0	2.1	15.8	48.5	11.6	40.2	23.2	123.5	14.5	2.7	16.9	2.9	36.4
22	10	2.3	22.0	9.2	0.4	0.3	0.1	10.0	3.8	0.5	0.2	0.1	4.6
7646	0	2.5	14.3	22.3	0	18.2	8.3	48.8	17.6	0	5.8	0.9	24.3
26													
7647	0	2.1	16.6	33.6	3.1	14.5	9.4	60.6	12.1	3.2	5.0	1.6	21.9
16	10	2.2	18.0	9.5	0.4	15.0	9.6	34.5	2.5	1.4	6.3	1.0	11.2
7648	0	2.9	11.5	35.3	3.4	15.0	6.2	59.9	10.2	3.5	4.1	0.4	18.2
11	10	2.9	12.7	18.6	0.6	2.4	3.9	25.5	7.6	4.2	0.1	1.3	13.9
7649	0	3.5	7.1	36.3	0.1	7.3	12.1	55.8	8.3	0.4	2.2	1.3	12.2
12	5	3.5	7.1	14.7	1.1	6.9	1.0	23.7	6.3	3.1	0.7	2.3	12.4
7650	0	3.9	6.6	36.7	1.4	13.7	18.0	69.8	9.1	0.6	4.0	2.0	15.7
17	10	3.9	6.8	21.9	0	3.8	3.0	28.7	9.2	0	0.1	0.1	9.4
7651	0	4.4	5.3	73.9	0	11.3	10.0	95.2	17.8	0	3.2	1.3	22.3
20	10	4.4	5.3	36.4	0.1	9.4	2.6	48.5	8.4	1.6	0.2	4.0	14.2
7653	0	2.3	10.8	35.6	4.4	16.8	26.8	83.6	10.7	6.7	4.4	1.6	23.4
12	5	2.3	10.8	17.1	0.3	0.8	0.8	19.0	4.6	0.1	0.4	0.4	10.1
7654	0	2.1	12.8	29.8	0.9	6.6	7.1	44.4	7.7	2.9	1.0	1.0	12.6
11	5	2.1	12.8	8.0	0.3	0.6	0.8	9.7	2.6	3.6	0.2	0.1	6.5
7655	0	1.9	14.0	16.3	2.2	4.6	12.0	35.1	8.2	2.8	2.4	1.5	14.9
13	5	1.9	14.0	4.0	1.8	2.2	6.5	14.5	4.0	3.3	0.7	0.8	8.8
7656	0	2.2	12.7	30.8	4.9	6.2	6.3	48.2	10.1	11.4	1.8	0.7	24.0
12	5	2.2	12.7	9.9	0.4	1.3	1.4	13.1	1.9	2.2	0.4	0.5	5.0
7657	0	1.9	15.1	23.7	1.0	6.7	12.4	43.8	8.0	3.9	1.8	0.7	14.4
16	10	1.9	15.1	13.0	0.6	3.9	6.5	24.0	2.2	0.7	1.2	0.4	4.5
7658	0	2.8	8.9	67.6	0.8	13.2	25.6	107.2	23.1	0.3	4.0	2.7	30.1
18	9	1.1	18.7	19.9	1.2	6.5	15.9	43.5	5.7	0.2	1.1	0.9	7.9

Примечание. $Гл_м$ – глубина места, м; $Гл_м$ – глубина отбора пробы, м; D – диатомовые; P – перидиниевые; Cr – криптофитовые; Rest – остальные группы; Tot – суммарное значение.

Fragilariopsis cylindrus. Его численность в столбе воды составляла 29.0×10^3 и 50.0×10^3 кл/л, биомасса – 9.0 и 13.1 мг/м^3 соответственно. В наших предыдущих наблюдениях, выполненных в конце сентября 2007 г. и во второй половине июля 2016 г., в этой части эстуария соленость не превышала 0.4 епс [3, 9, 10]. В этих условиях здесь были встречены только пресноводные виды водорослей, среди которых доминировали виды рода *Aulacoseira*, численность которых достигала $1.1–8.1\times10^6$ кл/л, биомасса – 1.3–10.5 мг/м^3, а доля в общей численности и биомассе фитопланктона колебалась от 85 до 95% [2, 5, 10, 16–18]. В наших нынешних наблюдениях в период, предшествующий ледоставу, *Aulacoseira* были встречены только в виде мертвых клеток с численностью в поверхностном слое от 22.9×10^3 (ст. 7647) до 340.0×10^3 кл/л на самой южной станции (ст. 7651) (рис. 4).

В пределах эстуария морские диатомовые водоросли, среди которых доминировал *Fragilariopsis cylindrus,* также формировали основу численности и биомассы фитопланктона. Численность вида составляла от 12.5×10^3 до 73.9×10^3 кл/л, биомасса – от 3.3 до 17.8 мг/м^3 и он формировал 30 до 78% от суммарного обилия и от 28 до 80% от суммарной биомассы водорослей. Вид был представлен короткоцепочечными колониями (как правило, 2–4 клетки), в популяции было много

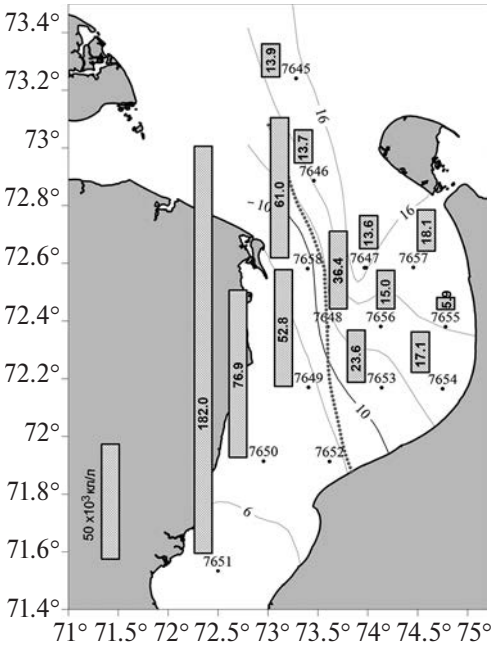

Рис. 4. Распределение численности мертвых клеток видов рода *Aulacoseira*, $N\times10^3$ кл/л на фоне распределения поверхностной солености в Обском эстуарии.

мертвых клеток, что указывало на завершение фазы вегетации. В районе мелководного шельфа (станции 7645, 7646) и в северной части эстуария (станции 7647, 7648) живых клеток вида было больше, чем мертвых – от 53 до 70%, на ст. 7658 в области эстуарного фронта – 50%. На всей остальной акватории эстуария число мертвых клеток в популяции *F. cylindrus* варьировало от 56 до 69%. В другие сезоны этот вид был встречен в основном на мелководном шельфе в виде активно вегетирующих многоклеточных ленточных колоний.

На шельфовых станциях 7645–7646, ст. 7658 в области эстуарного фронта и в охваченной съемкой восточной части Обского эстуария на станциях 7653–7657 вторым по численности видом диатомовых ($(1.1–7.7)\times10^3$ кл/л) была *Skeletonema costatum*. На станциях 7645–7646 единично встречалась *Thalassionema nitzschioides*.

Следующей по численности группой в исследованном районе были жгутиковые. В западной части эстуария и на прилежащем внутреннем шельфе (станции 7645–7649) до 70% численности приходилось на долю видов класса Cryptophyceae (~300 мкм^3). На остальных станциях численно преобладали жгутиковые классов Prymnesiophyceae и Chlorophyceae с диаметром клеток 5–7 мкм.

Численность динофлагеллят в исследованном районе составляла от 1.0×10^3 до 6.0×10^3 кл/л, их вклад в общее обилие фитопланктона повсеместно не превышал 9%. На южных станциях 7649–7651 и на ст. 7658 он был минимальным и составлял от 0.1 до 1.6%. На большей части станций по численности преобладала мелкая *Heterocapsa rotundata* (объем клеток ~450 мкм^3). Биомасса динофлагеллят составляла от 0.2 до 6.8 мг/м^3. Вклад группы в общую биомассу фитопланктона варьировал в широких пределах – от 0.5 до 47.6%. Он был минимальным – 0.5–3.8% – на станциях 7650, 7651 и 7658 в струе обского течения и области эстуарного фронта, и максимальным – от 19.0 до 47.1% – в восточной части Обского эстуария (станции 7653–7657). В последнем районе высокая доля динофлагеллят была ассоциирована с встречаемостью *Gymnodinium spp*. (до 1.9×10^3 кл/л) и присутствием немногочисленных *Heterocapsa triquetra* и крупноклеточных *Dinophysis acuminata* (объем клетки ~10000 мкм^3), проникающих в эту зону с шельфовыми водами.

Осенью, в период предшествующий ледоставу, различия в численности и биомассе фитопланктона по разные стороны квазимеридионального фронтального раздела были незначительны и не превышали двух раз (см. рис. 2). Аналогичные различия в летнее и раннеосеннее время превышали порядок величин [16–18]. В предзимний период по обе стороны фронта в фитопланктоне доминировал морской вид *Fragilariopsis cylindrus*. Доминирование одного вида по разные стороны фронтального раздела, низкая численность и биомасса водорослей кардинально отличались от летнего и раннеосеннего состояния фитопланктона, когда широкая фронтальная зона располагалась между 72 и 73° с. ш. и смена условий среды в ней определяла границы распространения пресноводного и морского комплексов видов.

В проведенных ранее исследованиях гидрохимической структуры в разных зонах Обского эстуария в период высокой (весенний сток) и низкой (осенний сток) воды была показана струйность стокового течения и неоднородность условий на разрезах поперек эстуария в весенний и летний сезоны, а также выравнивание практически всех гидрохимических характеристик в позднелетний и осенний сезоны [1, 5, 14]. Аналогичными гидрохимическими условиями эстуарий характеризовался и в период наших позднеосенних наблюдений. В [6, 14] было показано, что в наибольшей степени вне влияния основного стокового течения находится восточная расширенная область внешней части Обского эстуария – “эстуарный мешок”. Подтверждением обособленности этой области Обской губы было наблюдаемое нами в этом районе в летнее время (июль 2016 г.) локальное “цветение” воды, вызванное

массовым развитием эвгленовой водоросли *Euglena sp*. [20]. В наших наблюдениях в предзимний сезон были также отмечены отличия фитопланктона “эстуарного мешка”, проявившиеся в небольшом увеличении биомассы динофлагеллят. Специфика условий в этой части Обского эстуария показана нами и на основании учета мертвых клеток *Aulacoseira* – маркера пресноводного фитоцена (см. рис. 3). Высокая численность клеток *Aulacoseira* была приурочена к основному потоку Обских вод вдоль западного берега эстуария (станции 7649–7651) и области эстуарного фронта (ст. 7658), где она составляла от 52.8 до 182×10^3 кл/л. В прилежащей восточной части эстуария (станции 7647, 7653–7657) численность этого маркера была на порядок меньше: 5.9–23.6×10^3 кл/л. Проанализированные нами пробы верхнего наилка, полученные из бокс-корера на поперечном разрезе через широкую область эстуария (станции 7647, 7657 и 7658), также показали резкое сокращение числа мертвых клеток *Aulacoseira* в осадке в направлении с запада на восток.

Материалы проведенных наблюдений с учетом полученных нами ранее данных по фитопланктонным сообществам Обского эстуария [16–18, 19] позволили предложить схему районирования внешней части Обской губы (рис. 5). Схема отражает границы между фитоценозами разного состава и количественных характеристик (табл. 2) и специфику условий в восточной области широкой части эстуария. Последнее, очевидно, может иметь значение при оценке неравномерности аккумуляции аллохтонного вещества, включая загрязнения, выносимого речным стоком и интенсивно выпадающего в осадок в области биогеохимического барьера, ассоциированного с эстуарной фронтальной зоной [3, 8, 11], а также неравномерности процессов регенерации вещества в донных осадках.

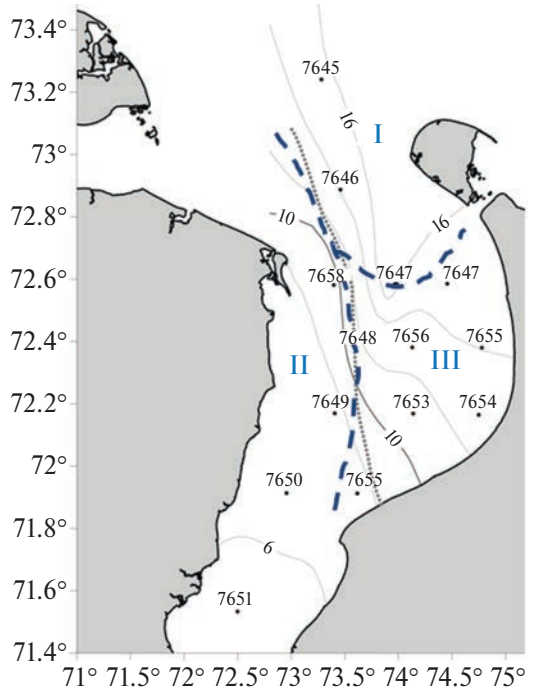

Рис. 5. Схема районирования Обского эстуария в сезон, предшествующий ледоставу. I – прилежащий к эстуарию мелководный шельф, II – основное обское течение, III – восточная область внешней части эстуария.

Благодарности. Авторы приносят благодарность А.А. Полухину за данные по гидрохимии, предоставленные для настоящей статьи.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2024-0021; экспедиционные исследования проведены при целевой финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Таблица 2. Районы Обского эстуария с различными свойствами среды и количественными характеристиками фитопланктона

№ станции	T_o	T_{5-10}	S_o	S_{5-10}	N_o	N_{5-10}	B_o	B_{5-10}
Прилежащий к эстуарию мелководный шельф								
7645–7648	2.1–2.9	2.2–2.9	11.5–16.6	12.7–22.0	60.1–123.5	15.2–34.5	18.2–37.0	4.9–13.9
Основное обское течение								
7649–7651	3.5–4.4	3.5–4.4	5.3–7.1	5.3–7.1	55.0–95.2	23.7–48.5	12.2–22.3	10.6–14.2
7658	2.8	1.1	8.9	18.7	107.0	43.5	30.1	10.7
Восточная область внешней части эстуария								
7653–7657	1.9–2.3	1.9–2.3	10.8–15.1	10.8–15.1	35.1–83.7	9.7–24.0	12.6–24.0	5.0–10.0

Примечание. T_o – температура поверхности моря, °С; T_{9-10} – температура на горизонте 9–10 м, °С; S_o – соленость поверхности моря, епс; S_{9-10} – соленость на горизонте 9–10 м, епс; N_o – численность фитопланктона в поверхностном слое, $\times10^3$ кл/л; N_{9-10} – численность фитопланктона на горизонте 9–10 м, $\times10^3$ кл/л; B_o – биомасса фитопланктона в поверхностном слое, мг/м^3; B_{9-10} – биомасса фитопланктона на горизонте 9–10 м, мг/м^3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артамонова К.В., Лапин С.А., Лукьянова О.Н. и др.* Особенности гидрохимического режима Обской губы в период открытой воды // Океанология. 2013. Т. 53. № 3. С. 357–366.
2. *Гаевский Н.А., Семенова Л.А., Матковский А.К.* Трофический статус вод экосистемы Обско-Тазовской устьевой области по показателям фитопланктона // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2010. № 10. С. 170–179.
3. *Емельянов Е.М.* Барьерные зоны в океане. Осадко- и рудообразование. Геоэкология. Калининград: Янтарный сказ, 1998. 410 с.
4. *Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В. и др.* Поверхностный опресненный слой в Карском море // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
5. *Киселев И.А.* О флоре водорослей Обской Губы с приложением некоторых данных о водорослях нижней Оби и Иртыша // Водоросли и грибы Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1970. Ч. 1(13). С. 41–54.
6. *Лапин С.А.* Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // Океанология. 2011. Т. 51. № 6. С. 984–993.
7. *Лапин С.А.* Особенности формирования пресноводного стока в эстуарных системах Оби и Енисея // Труды ВНИРО. 2017. Т. 166. С. 139–150.
8. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
9. *Левитан М.А., Буртман М.В., Демина Л.Л. и др.* Фациальная изменчивость поверхностного слоя осадков Обь-Енисейского мелководья и эстуариев Оби и Енисея // Литология и полезные ископаемые. 2005. № 5. С. 472–484.
10. *Матишов Г.Г., Дружков Н.В., Макаревич П.Р. и др.* Роль пресноводного фитопланктона в формировании области повышенной продуктивности на Обь-Енисейском мелководье // Докл. РАН. 2001. Т. 378. № 3. С. 424–426.
11. *Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Асадулин Э.Э. и др.* Радиационно-геохимическая устойчивость донных осадков в эстуариях Оби и Енисея и на прилежащем мелководье // Океанология. 2020. Т. 60. № 6. С. 930–944.
12. *Никаноров А.М., Иванов В.В., Брызгало В.А.* Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. Ростов-на-Дону: НОК, 2007. 271 с.
13. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
14. *Стунжас П.А., Маккавеев П.Н.* Объем вод Обской губы как фактор формирования гидрохимической неоднородности // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 622–634.
15. *Суханова И.Н.* Концентрирование фитопланктона в пробе // Современные методы количественной оценки распределения морского планктона. М.: Наука, 1983. С. 97–105.
16. *Суханова И.Н., Флинт М.В., Мошаров С.А. и др.* Структура сообществ фитопланктона и первичная продукция в Обском эстуарии и на прилежащем Карском шельфе // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 785–800.
17. *Суханова И.Н., Флинт М.В., Сергеева В.М. и др.* Фитоценозы эстуариев Оби и Енисея и Обь-Енисейского взморья // М.В. Флинт (ред.). Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований. Материалы научной конференции. М.: АПР, 2015. С. 105–111.
18. *Суханова И.Н., Флинт М.В., Сахарова Е.Г. и др.* Фитоценозы Обского эстуария и Карского шельфа в поздневесенний сезон // Океанология. 2018. Т. 58. № 6. С. 882–898.
19. *Суханова И.Н., Флинт М.В., Маккавеев П.Н. и др.* Структура фитоценозов Енисейского эстуария и прилежащего Карского шельфа в поздневесенний сезон // Океанология. 2020. Т. 60. № 6. С. 858–875.
20. *Суханова И.Н., Флинт М.В.* Массовое развитие *Euglena sp.* (Euglenophyceae, Euglenales) во внешней части Обского эстуария // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 590–597.
21. *Флинт М.В., Семенова Т.Н., Арашкевич Е.Г. и др.* Структура зоопланктонных сообществ в области эстуарной фронтальной зоны реки Обь // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 809–822.
22. *Drits A.V., Pasternak A.F., Arashkevich E.G. et. al.* The dominant copepods *Senecella siberica* and *Limnocalanus macrurus* in the Ob Estuary: ecology in a high-gradient environment // Polar Biology. 2016. V. 39. № 9. P. 1527–1538.
23. *Drits A., Pasternak A., Flint M.* Distribution and grazing of dominant zooplankton species in the Ob Estuary: influence of the runoff regime // Estuaries and Coasts. 2017. V. 40. P. 1082–1095.
24. *Drits A.V., Pasternak A.F., Arashkevich E.G. et al.* Distribution and grazing of the dominant mesozooplankton species in the Yenisei estuary and adjacent shelf in early summer (July 2016) // Continental Shelf Research. 2020. V. 201. Arte. 104133.
25. *Futterer D.K., Galimov E.M.* Siberian river run-off in the Kara Sea: characterization, quantification, variability and environmental significance. Siberian river run-off in the Kara Sea / Eds. Stain R. et al. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2003. P. 1–8.
26. *Gordeev V.V., Martin J.M., Sidirov M.V. et al.* A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // Amer. J. Sci. 1996. № 296. P. 664–691.
27. *Makarevich P.R., Druzhkov N.V., Larionov V.V. et. al.* The freshwater phytoplankton biomass and its role in the formation of a highly productive zone on the Ob-Yenisei shallows (southern Kara Sea) // Proc. Mar. Sci. 2003. V. 6. P. 185–195.

PHYTOPLANKTON OF OB ESTUARY (KARA SEA) IN THE SEASON PRECEDING WINTER

I. N. Sukhanova[a], M. V. Flint[a, *], A. V. Fedorov[b], A. A. Nedospasov[a], S. G. Poyarkov[a]

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

[b] *Southern Branch, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Gelendzhik, Russia*

* *e-mail: m_flint@ocean.ru*

Material was obtained during cruise 92 of R/V "Akademik Mstislav Keldish" in the area with latitudilal extent 72°32.0' to 73°14.5' N including Ob river estuary and adjacent shallow shelf on October 12–13 in a period preceding seasonal ice formation. Estuarine front was well pronounced in salinity (gradients 0.6 PSU/km) and temperature and had quasimeridional direction. Sharp borders in distribution of nutrients typical for earlier seasons were not observed. Numbers and biomass of phytoplankton varied in a range of 22×10^3 to 75×10^3 cell/l and 7.3 to 19.0 mg/m^3, correspondingly, which were two to three orders of magnitude lower than in July and September observations. The basis of phytoplankton numbers (30–78%) and biomass (28–80%) across the whole area was formed by diatoms among which *Fragilariopsis cylindrus* dominated. Abundance of freshwater diatoms *Aulacoseira* was low and the species was presented only by dead cells. The scheme is presented which reflects borders between phytoplankton communities of different composition and quantitative characteristics as well as specificity of conditions in the eastern area of the wide external part of Ob river estuary.

Keywords: Kara Sea, late fall season, Ob river estuary, estuarine front, shallow shelf, phytoplankton communities

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 570–584

МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ

УДК 597.08.591.3.574.52

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧЕРНОМОРСКОГО ИХТИОПЛАНКТОНА В УСЛОВИЯХ АКТИВИЗАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕТНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ СЕЗОН 2021 г.

© 2024 г. Т. Н. Климова*, А. А. Субботин, И. В. Вдодович, Ю. А. Загородняя, Д. А. Забродин

Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: tnklim@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.11.2023 г.
После доработки 20.12.2023 г.
Принята к публикации 28.12.2023 г.

Представлено видовое разнообразие, численность и особенности распределения ихтиопланктона и кормового зоопланктона в северной части Черного моря летом 2021 г. Усиление циклонической деятельности над Черным морем в июне–июле замедлило процесс формирования летнего типа термической стратификации вод на исследуемой акватории. В начале июля у Крымского полуострова в ихтиопланктоне отмечено всего 13 видов икры и личинок рыб, их средняя численность составляла 29 и 2 экз/м^2 соответственно. В начале августа вертикальная термическая стратификация вод летнего типа у берегов Кавказа уже сформировалась. Количество видов в ихтиопланктоне возросло до 20. Активизация атмосферных процессов в июне–июле интенсифицировала внутрисезонную ветровую "накачку" верхнего слоя моря. Основное Черноморское течение трансформировалось в ярко выраженный поток, ориентированный вдоль континентального склона, частично распространяясь на шельф. Это не повлияло на нерестовую активность массовых видов рыб. Средняя численность икры в шельфовой и глубоководной зонах составляла около 160 экз/м^2. В то же время средняя численность личинок на шельфе была почти в пять раз выше и составляла 452 экз/м^2.

Ключевые слова: ихтиопланктон, видовое разнообразие, пространственное распределение, кормовой зоопланктон, питание личинок рыб, гидрологический режим, Черное море

DOI: 10.31857/S0030157424040023, **EDN:** PSBFAG

ВВЕДЕНИЕ

Регулярные ихтиопланктонные исследования северной части Черного моря в пределах экономической зоны России на НИС "Профессор Водяницкий" начались с 2016 г. Полученные данные, наряду с отдельными съемками с 2005 по 2013 г., позволили оценить современное состояние ихтиопланктонных комплексов, характер их изменений после деградации экосистемы моря с конца 1980-х гг. [23, 30], а также уровень соответствия устойчивому состоянию 1950–1970 гг. [6].

Климатические изменения гидрологического режима и динамики вод Черного моря и его отдельных акваторий в период с 1990-х гг. по настоящее время [2, 4, 13, 14, 19, 26, 35, 36, 39] привели к изменениям параметров устоявшихся гидрологических сезонов. Сезонность гидрологических процессов и явлений, влияя на изменение условий обитания и воспроизводство морских организмов, в конечном итоге определяет их биологические циклы, в том числе и фенологию нереста, видовое разнообразие, численность, пространственное распределение и трофические взаимоотношения в планктонном сообществе [16, 29]. В Черном море отмечены смещение и перекрытие сроков нереста тепловодных и умеренноводных рыб в начальной и конечной фазах гидрологических сезонов, что привело к одновременному присутствию в ихтиопланктоне их икры и личинок. Отмечены снижение размерно-весовых характеристик личинок, увеличение доли икры и личинок прибрежных видов рыб в открытых водах шельфа. С начала 2000-х гг. наблюдаются изменения видового разнообразия гидробионтов, формирующих кормовую базу личинок рыб и их трофические взаимоотношения в планктонном сообществе [31–33, 41].

Отмеченные изменения отразились на состоянии ихтиопланктона в летний нерестовый сезон, поскольку региональные условия прогрева верхнего слоя моря и формирования вертикальной термической стратификации летнего типа в начальной фазе летнего гидрологического сезона являются основными лимитирующими факторами результативности нереста, выживания рыб на ранних стадиях развития и пополнения будущих поколений. В процессе развития нереста при уменьшении пространственных неоднородностей поверхностной температуры возрастает роль динамических факторов, прежде всего, сезонного ослабления Основного Черноморского течения (ОЧТ), активизации синоптических и региональных квазистационарных термодинамических образований, зон конвергенции и дивергенции течений. С одной стороны, активизация прибрежно-шельфовых квазистационарных антициклонических вихрей (АЦ) способствует формированию устойчивых зон с благоприятными для эффективного нереста и выживания личинок рыб термодинамическими и кормовыми условиями. С другой – система циркуляции вод в АЦ способствует активному водообмену прибрежно-шельфовых вод и вод открытого моря, расширению ареалов нереста и обмену видами между отдельными акваториями [28, 32, 33].

Помимо основных лимитирующих факторов среды, определяющих жизненный цикл черноморских рыб в период размножения, ряд других абиотических факторов также становятся лимитирующими – прямо или косвенно. Среди них важную роль играет ветро-волновая деятельность. С одной стороны, усиление ветра влияет на структуру и интенсивность поверхностных течений, с другой – деформирует вертикальную термическую структуру вод за счет обрушения ветровых волн, и в обоих случаях лимитирует поведенческие реакции и физиологическое состояние нерестящихся рыб [12, 32, 33].

В восточной части Черного моря преобладание северных ветров в теплый период года в последние десятилетия периодически создает “блокирующий” эффект в системе общей циркуляции вод, ослабляет северо-западный перенос, способствует усилению меандрирования струи ОЧТ и изменяет зоны локализации прибрежных АЦ [10, 24]. С другой стороны – в результате активизации циклонической деятельности над исследуемой акваторией происходит внутрисезонная ветровая “накачка” верхней толщи вод, что приводит к инерционной трансформации ОЧТ в ярко выраженный поток, ориентированный вдоль континентального склона и местами внедряющийся на шельф [9, 10]. Усиление ветро-волнового перемешивания во время сильных штормов трансформирует термическую структуру верхнего слоя моря за счет вовлечения более холодных вод из сезонного термоклина (СТ), способно понизить температуру воды до значений, неблагоприятных для нереста тепловодных видов рыб, и тем самым замедлить процесс начала летнего нерестового сезона или даже прервать его на некоторое время [20, 27, 33]. Кроме того, динамическое воздействие от обрушения волн приводит к увеличению смертности икры и личинок рыб [6, 12].

Целью данного исследования был анализ видового состава и пространственного распределения летнего ихтиопланктона, кормовой базы личинок рыб в период формирования вертикальной термической структуры вод летнего типа в условиях активизации атмосферных процессов над центральной и восточной частями Черного моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал собран с 29 июня по 9 августа 2021 г. в северной части Черного моря у Крымского полуострова и берегов Кавказа в 117-м рейсе НИС “Профессор Водяницкий”. Сбор проб ихтиопланктона осуществляли сетью Hensen (диаметр входного отверстия 0.7 м, ячея сита 400 мкм), проб зоопланктона – сетью Джеди (диаметр входного отверстия 36 см, ячея сита 145 мкм). Пробы собирали в режиме вертикальных ловов от дна до поверхности моря в области мелководного шельфа и от нижней границы кислородной зоны (σ_t = 16.2 по данным зондирующего CTD комплекса IDRONAUT OCEAN SEVEN320 PlusM) до поверхности моря в глубоководной части. Зоо- и ихтиопланктон фиксировали 4% забуференным боратами раствором формалина и обрабатывали в стационарных условиях под МБС-10 при увеличении 8×2 и 8×4. Идентификацию ихтиопланктона проводили по [5], зоопланктона – по [17, 18]. Видовые названия гидробионтов даны по Всемирному реестру морских видов [40]. Численность ихтиопланктона приведена в экземплярах под квадратным метром поверхности моря. Численность и биомасса зоопланктона даны в метрах кубических всего обловленного слоя.

Питание личинок рыб изучали по методике [8]. Личинки хамсы и ставриды по морфологическим показателям были разделены на размерные группы [7, 22]. Массу тела личинок рыб измеряли на торсионных весах, молодь взвешивали на электронных весах AXIS ADG500C. При исследовании

питания личинок их вскрывали под микроскопом МБС-9, извлекали содержимое кишечников, в котором идентифицировали пищевые объекты, затем их просчитывали и измеряли под микроскопом Nikon Eclipse 200 при увеличении 40×.

Для анализа гидрологического режима и структуры поверхностных течений использовали экспедиционные данные вертикальных зондирований CTD комплексом IDRONAUT OCEAN SEVEN320 PlusM, а также материалы спутниковых наблюдений температуры поверхности моря (ТПМ) и расчетные карты геострофических и ветровых течений [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гидрологическая характеристика районов исследований. Сложные метеоусловия с чередованием периодов активной ветро-волновой деятельности и периодов относительного затишья с устойчивым радиационным прогревом верхнего слоя моря, наблюдаемые в центральной и восточной частях Черного моря в июне–июле 2021 г., обусловили особенности формирования термодинамической структуры вод и ход выполнения исследований в 117-м рейсе. Как результат, ихтиопланктонная съемка выполнялась в два этапа при относительно спокойных метеоусловиях в разных районах моря у берегов Крыма и Кавказа. Быстрая смена погодных условий и региональная инерционность прогрева верхнего слоя моря обусловили выделение отдельных секторов исследований в пределах соответствующих этапов. Первый этап съемки проходил с 29 июня по 7 июля в районе Крымского полуострова, где были выделены три сектора: юго-западный (акватория г. Севастополя и Вековой разрез), сектор южного берега Крыма (ЮБК, от б. Ласпи до г. Алушта) и восточный (от Судакской бухты до м. Чауда). Второй этап съемки проводили с 30 июля по 9 августа в секторах у берегов Кавказа и в районе Керченской предпроливной зоны (рис. 1).

Первый этап съемки выполнялся в начальной фазе летнего гидрологического сезона. Ему предшествовали умеренно-теплый зимний гидрологический сезон с диапазоном изменчивости ТПМ от 10–11°С в начале января, с минимальными значениями от 8.0–8.5°С – в феврале и плавным увеличением до 11–12°С – в конце апреля. Весенний гидрологический сезон начался только в начале мая и продолжался до середины третьей декады июня с увеличением ТПМ до 20–21°С. С начала июня по середину его третьей декады над Черным морем отмечалось усиление циклонической деятельности, что замедлило процесс формирования летнего типа термической стратификации [3, 15].

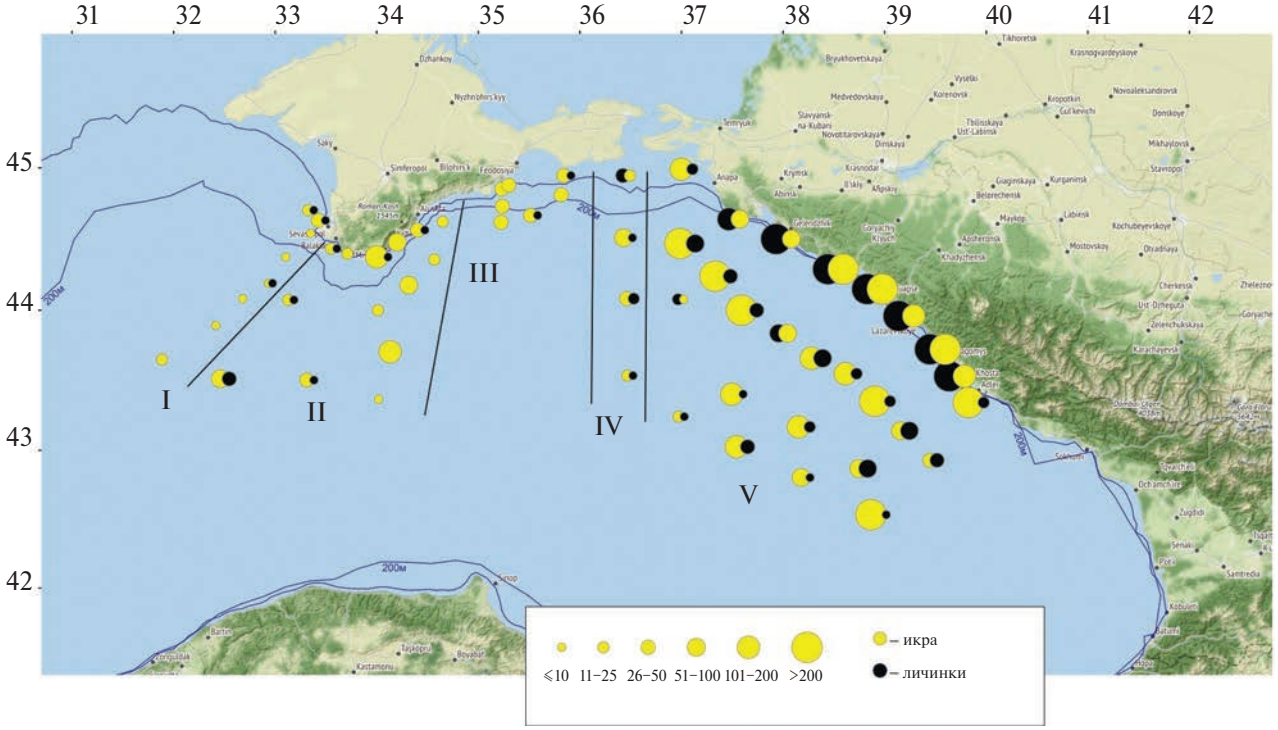

Рис. 1. Карта-схема пространственного распределения икры и личинок рыб в 117-м рейсе НИС “Профессор Водяницкий”. I – Юго-западный сектор; II – сектор ЮБК; III – Восточный сектор; IV – Керченский сектор; V – Кавказский сектор.

К началу съемки большая часть акватории моря прогрелась до 23–24°С. Минимальные значения ТПМ (19–21°С) соответствовали узкой прибрежной зоне от м. Фиолент до Феодосийского залива, как следствие проявления трансформированного прибрежного апвеллинга, а максимальные (до 24–25°С) – шельфовым и открытым водам в пределах сектора ЮБК (рис. 2а).

Преобладание облачной погоды в течение всего этапа съемки практически не изменило картину пространственного изменения ТПМ, лишь расширив зону максимального прогрева до Феодосийского залива (рис. 2б).

Чередование коротких периодов активного радиационного прогрева верхнего слоя моря с периодами усиления ветрового волнения в июне замедлило процесс формирования термической структуры вод летнего типа. В течение съемки толщина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) составляла 6–9 м, а СТ имел слабоградиентную структуру с нижней границей до 17–20 м. В зоне прибрежного апвеллинга слой максимальных вертикальных градиентов температуры наблюдался от поверхности до дна. После длительного периода с последнего обновления холодного промежуточного слоя зимой 2016–2017 гг. [14], минимальные значения температуры в толще вод по всей исследуемой акватории отмечались в диапазоне 8.4–8.7°С на горизонтах от 40 до 47 м.

Соленость поверхностных вод изменялась от минимальных значений 17.8–17.9‰ в районе Феодосийского залива до 18.2–18.4‰ – в зоне ОЧТ и до 18.4–18.6‰ – в центральных районах моря.

Поверхностная циркуляция зимнего типа, наблюдающаяся до первой декады июня, в течение месяца существенно трансформировалась в систему отдельных динамических структур без ярко выраженной струи ОЧТ с отсутствием характерных для этого периода года прибрежно-шельфовых квазистационарных АЦ и отличалась слабыми и неустойчивыми течениями со скоростями до

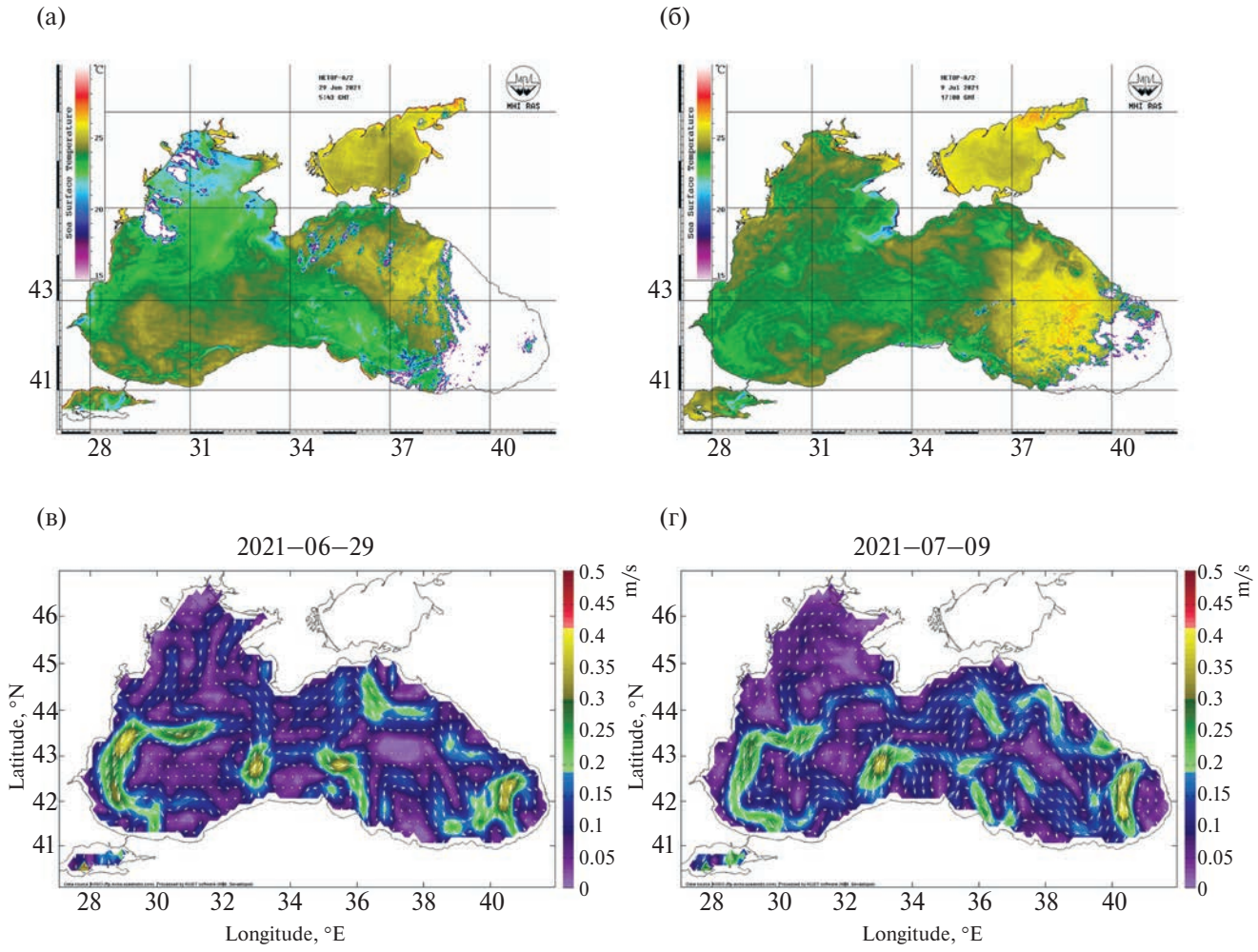

Рис. 2. Спутниковые карты распределения ТПМ (29.06.2021 (а), 09.07.2021 (б)) и расчетные схемы геострофических течений (29.06.2021 (в), 09.07.2021 (г)) в период выполнения первого этапа съемки [15].

10–15 см/с [1, 11, 15]. Наиболее значимым элементом динамической структуры вод являлся циклонический меандр ОЧТ к югу от Феодосийского залива (рис. 2в, г).

В середине первой декады июля погодные условия были осложнены выходом на Черное море очередного активного циклона. Его последующее углубление и локализация в северо-восточной части моря привели к усилению северных и северо-восточных ветров до 12–15 м/с, а волнения – до 4 б. Влияние этого малоподвижного циклона в районе исследований отмечалось до 9 июля [15]. Второй этап съемки проводили с 30 июля по 9 августа в прибрежно-шельфовой зоне и в глубоководных участках моря вдоль берегов Кавказа от Керченского пролива до границы экономической зоны России в условиях сформировавшейся вертикальной термической стратификации вод летнего типа с максимальным прогревом верхнего слоя моря. Следует отметить, что в течение июля над Черным морем наблюдалось прохождение еще одного активного циклона (21–22.07) и атмосферного фронта (26.07) [15].

Преобладание малооблачной погоды в период выполнения работ обеспечили интенсивный прогрев поверхностных вод с 25–27°С в начале съемки до 28–29°С – в конце. Наиболее высокие значения ТПМ соответствовали струе ОЧТ и глубоководным районам моря в юго-восточной части исследуемой акватории (рис. 3а, б).

Толщина ВКС варьировала от 7–11 м в глубоководных районах до 12–14 м – в струе ОЧТ и до 16–17 м – в прибрежно-шельфовой зоне. Минимальные значения температуры в ядре трансформированного холодного промежуточного слоя составляли 8.6–8.8°С при глубине залегания от 40–45 м в глубоководных районах до 85–90 м – над свалом глубин.

Соленость поверхностных вод изменялась в широком диапазоне от 18.6–18.85‰ в глубоководных районах моря до менее 18‰ – в узкой прибрежной зоне с минимальными значениями 17.7–17.8‰ южнее Геленджика в районах разгрузки горных рек.

К началу съемки у берегов Кавказа структура поверхностных течений характеризовалась отсут-

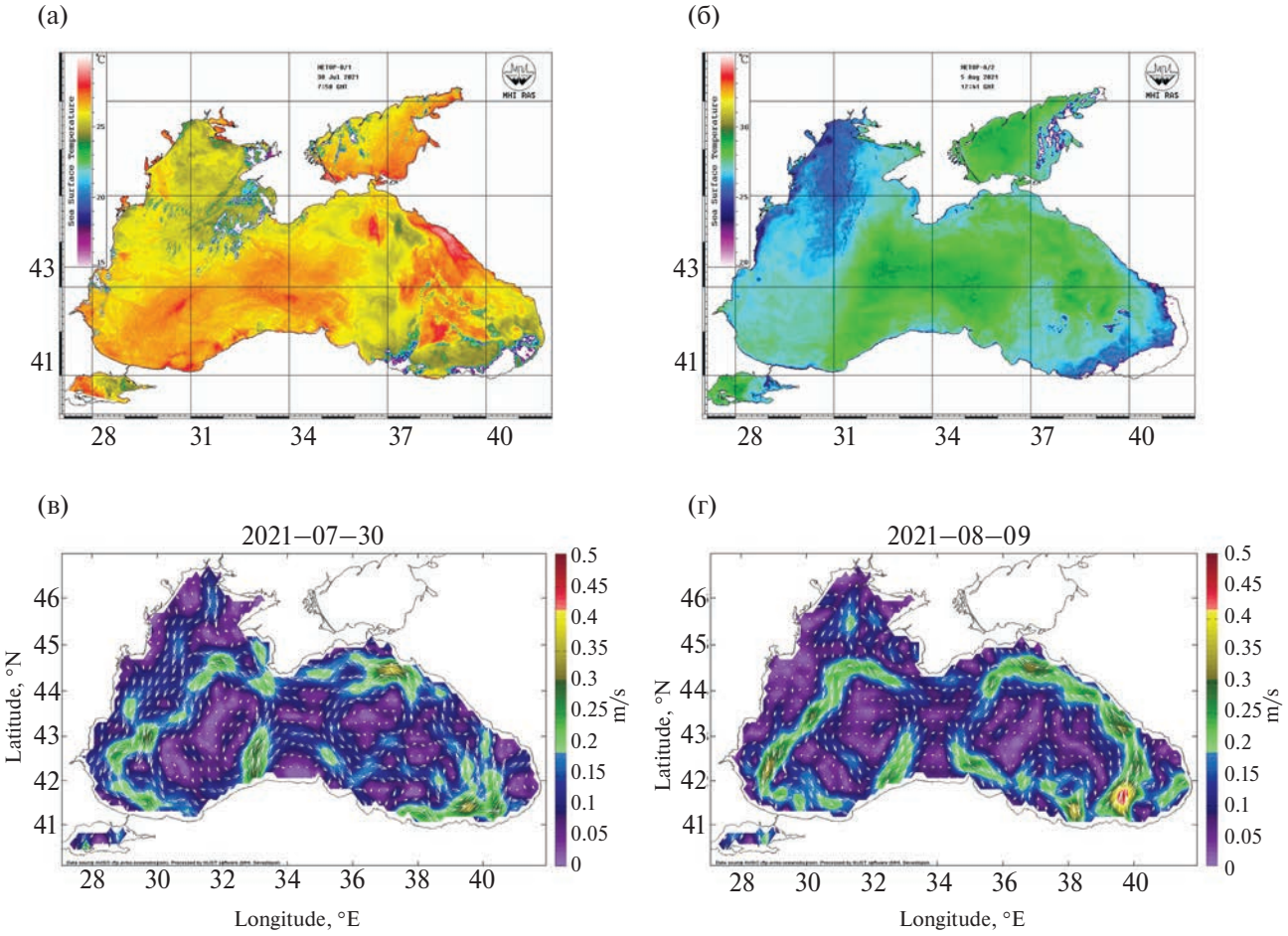

Рис. 3. Спутниковые карты распределения ТПМ (30.07.2021 (а), 05.08.2021 (б)) и расчетные схемы геострофических течений (30.07.2021 (в), 09.08.2021 (г)) в период выполнения второго этапа съемки [15].

ствием ярко выраженной струи ОЧТ, а из синоптических и квазистационарных термодинамических образований проявлялся только Кавказский АЦ в районе его типичного нахождения для этого периода года [11, 24] (рис. 3в). Уже к 3 августа ОЧТ резко усилилось и превратилось в сплошной поток шириной до 40 км со скоростями до 30–35 м/с, ориентированный вдоль континентального склона и местами внедряющийся в шельфовую зону Кавказа. К концу первой декады августа в восточной части моря сформировалось замкнутое циклоническое ядро ОЧТ. Циклонический меандр ОЧТ, наблюдаемый ранее южнее Феодосийского залива, "размылся" на фоне усиления струи ОЧТ, которая распространила свое влияние на прибрежно-шельфовую зону к югу от Керченского пролива, а Кавказский АЦ деформировался и локализовался в узкой прибрежной зоне на юго-востоке исследуемой акватории (рис. 3г). Наиболее вероятной причиной трансформации ОЧТ в ярко выраженный поток, не типичный для данного времени года, следует считать инерционную реакцию толщи вод на внутрисезонную ветровую "накачку" в период активизации циклонической деятельности над восточной частью моря в июне–июле [9, 10].

Работы в Керченском секторе были осложнены выходом на восток Черного моря активного малоподвижного циклона, определившего погодные условия в данном районе с 7 по 16 августа [15].

Ихтиопланктонные исследования. Всего в период исследований были идентифицированы икра и личинки 23 видов рыб из 15 семейств. Тепловодные виды были представлены 19, а умеренноводные – 4 видами. Средняя численность икры составляла 87.8, личинок – 74.4 экз/м^2.

Первый этап ихтиопланктонной съемки начинался с юго-западного сектора при ТПМ 19–21°С и волнении моря 1–2 б (см. рис. 1, 2а). В ихтиопланктоне идентифицированы икра и личинки 8 видов рыб (6 тепловодных и 2 умеренноводных). Нерест тепловодных видов рыб только начинался, средняя численность икры составляла 12.1, а личинок – 0.9 экз/м^2. В пробах преобладала икра четырех видов пелагофильных рыб (*Engraulis encrasicolus*, *Trachurus mediterraneus*, *Diplodus annularis* и *Arnoglossus kessleri*). Их доля в общей численности икры составляла 78.5%, однако нерест был еще безрезультативен. Максимальная численность икры (40 экз/м^2) наблюдалась в прибрежной зоне г. Севастополя над глубиной 70 м. Личинки были представлены только единичными экземплярами *Syngnathus schmidti* и *Gobius niger*. Под слоем термоклина продолжался нерест умеренноводных видов рыб, чья икра была представлена *Merlangius merlangus* и *Sprattus sprattus*, личинки – только *S. sprattus*.

В секторе ЮБК исследования выполнялись при прогреве верхнего слоя моря до 21–25°С и волнении до 2–3 б (рис. 1, 2б). Здесь, как и в юго-западном секторе, отмечены икра и личинки 8 видов рыб (5 тепловодных и 3 умеренноводных). Средняя численность ихтиопланктона в пробах возросла: икры до 37.3, личинок до 2.5 экз/м^2. Максимальная численность икры составляла 73 экз/м^2, личинок – 18 экз/м^2 (рис. 1; табл. 1). Отмечены четыре вида икры тепловодных пелагофильных видов рыб, среди которых

Таблица 1. Средняя численность (экз/м^2) икры (числитель) и личинок (знаменатель) рыб в различных районах исследований у берегов Крыма и Кавказа летом 2021 г.

Таксономический состав	Сектор исследований у Крымского полуострова				Кавказский сектор 30.07–07.08 2021 г.
	Юго-Западный 29–30.06 2021 г.	ЮБК 03–05.07 2021 г.	Восточный 06–07.07 2021 г.	Керченский 07–09.08 2021 г.	
Family: Engraulidae *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758)	5.0 0	23.7 2.2	21.7 0	36.3 7.6	154.7 143.5
Family: Clupeidae *Sprattus sprattus* (Linnaeus, 1758)	0.7 0.3	0.5 0			
Family: Gadidae *Merlangius merlangus* (Linnaeus, 1758)	1.9 0	3.5 0	4.0 0		0.8 0
Trisopterus luscus (Linnaeus 1758)		0 0.2			
Gadidae sp.					0 0.1
Family: **Syngnathidae** *Syngnathus schmidti* (Popov, 1927)	0 0.3	0 0.1		0 3.1	0 0.6

Таблица 1. Окончание

Таксономический состав	Сектор исследований у Крымского полуострова				Кавказский сектор 30.07–07.08 2021 г.
	Юго-Западный 29–30.06 2021 г.	ЮБК 03–05.07 2021 г.	Восточный 06–07.07 2021 г.	Керченский 07–09.08 2021 г.	
Family: Blenniidae *Parablennius zvonimiri* (Kolombatovic, 1892)					0 0.1
Blennius sp.					0 0.1
Family: Scorpaenidae *Scorpaena porcus* (Linnaeus, 1758)					0 0.3
Family: Callionymidae *Callionymus sp.*			0 0.5		0.1 0
Family: Gobiidae *Gobius niger* (Linnaeus, 1758)	0 0.3		0 0.7	0 1.3	0 1.2
Pomatoschistus marmoratus (Risso, 1810)			0 0.3		0 1.7
P. minutus (Pallas, 1770)					0 0.3
P. pictus (Malm, 1865)					0 0.7
Gobius sp.					0 0.1
Family: **Carangidae** *Trachurus mediterraneus* (Steindachner, 1868)	1.6 0	8.7 0	5.7 0	1.3 2.5	4.6 13.9
Family: Mullidae *Mullus barbatus* (Linnaeus, 1758)				1.3 0	0.4
Family: Pomatomidae *Pomatomus saltatrix* (Linnaeus, 1766)		0.8 0	0.3 0		0.3 0
Family: **Serranidae** *Serranus scriba* (Linnaeus, 1758)		0.1 0			
Family: Sparidae *Diplodus annularis* (Linnaeus, 1758)	2.6 0				0 0.7
Spicara smaris (Linnaeus, 1758)					0 0.2
Family: Trachinidae *Trachinus draco* **(**Linnaeus, 1758)					0 0.3
Family: Bothidae *Arnoglossus kessleri* (Schmidti,1915)	0.3 0				0 0.5
Количество видов	8	8	7	5	20
Средняя численность, экз/м^2	12.1 0.9	37.3 2.5	31.7 1.5	38.9 14.5	160.8 164.2
Стандартное отклонение	12.2 1.3	30.3 5.0	7.97 1.88	29.09 10.23	111.7 272.3

доминировала икра *E. encrasicolus* (63.5%), второй по обилию была *T. mediterraneus* (свыше 23%), икра *Pomatomus saltatrix* и *Serranus scriba* встречалась единично.

Результативным нерест был только у *E. encrasicolus,* доля ее личинок в пробах составляла 88%. Среди личинок тепловодных видов, кроме *E. encrasicolus,* единично встречалась *S. schmidti*. Продолжался нерест умеренноводных видов рыб, доли икры *M. merlangus* и *S. sprattus* в сумме составляли 11%. Личинки были представлены средиземноморским вселенцем *Trisopterus luscus* – 8% [31].

В связи с последующим усилением волнения в открытой части моря до 4 б район работ в Восточном секторе был ограничен прибрежно-шельфовой зоной (см. рис. 1). ТПМ изменялась от 22 до 24°С с повышением температуры от узкой прибрежной зоны до кромки шельфа (см. рис. 2б). В ихтиопланктоне отмечены 7 видов икры и личинок рыб, их средняя численность составляла 31.7 и 1.5 экз/м^2 соответственно. Преобладала икра *E. encrasicolus* (68.4%) и *T. mediterraneus* (18%), единично встречалась икра *P. saltatrix*. Личинки были представлены *Callionymus* sp. и двумя видами сем. Gobiidae. Максимальная численность икры (45 экз/м^2) была отмечена над свалом глубин, личинок (5 экз/м^2) – на мелководной станции над глубиной 30 м. Из умеренноводных видов рыб отмечена только икра *M. merlangus* (см. табл. 1).

Вдоль берегов Кавказа и в Керченском секторе ихтиопланктон собирали после перерыва с 08 по 29 июля, связанного с активизацией циклонической деятельности над северо-восточной частью моря в конце первой и в третьей декадах июля.

В Кавказском секторе съемка выполнялась в условиях сформировавшейся вертикальной термической стратификации вод летнего типа с максимальным прогревом верхнего слоя моря от 25 до 29°С при волнении моря 1–2 б (см. рис. 3а, б). Здесь были отмечены 20 видов икры и личинок рыб из 14 семейств (см. рис. 1, табл. 1). Тепловодные виды рыб были представлены 18 видами. Средняя численность икры у берегов Кавказа составляла 160.8, личинок – 164.2 экз/м^2. У 7 из 9 пелагофильных рыб нерест был результативным. В пробах доминировали икра и личинки *E. encrasicolus,* составляя 96.1 и 87.3% соответственно. Доля икры и личинок *T. mediterraneus* не превышала 3 и 8% соответственно, а икра и личинки остальных видов встречались единично. Видовой состав личинок из демерсальной икры расширился пятью видами из сем. Blenniidae и Gobiidae и *Spicara smaris*. Обилие личинок тепловодных видов рыб свидетельствовало об их массовом результативном нересте. Умеренноводные виды были представлены только единичными икринками *M. merlangus* и одной личинкой *Gadidae* sp.

В Керченском секторе ихтиопланктон собирали с 7 по 9 августа на фоне активизации струи ОЧТ при ТПМ 26.5–28.0°С и волнении моря от 2 до 4 б (см. рис. 1, 3г; табл. 1). Здесь нерестились всего 5 видов из 5 семейств рыб только тепловодного комплекса. Средняя численность икры составляла 38.9, личинок – 14.5 экз/м^2. В пробах доминировала *E. encrasicolus,* доля ее икры составляла 93.4, личинок – 52.4%. На трех глубоководных станциях в ихтиопланктоне были идентифицированы 4 вида икры и личинок рыб, средняя численность которых составляла 45.9 и 10.1 экз/м^2 соответственно. В шельфовых водах была выполнена только одна станция, где были отмечены также 4 вида икры и личинок рыб. Однако здесь по численности преобладали личинки, составляя 27.6 экз/м^2, численность икры не превышала 17.6 экз/м^2.

Размерно-весовые характеристики и питание личинок рыб. Всего было промерено 1022 экз. личинок *E. encrasicolus,* собранных в первой декаде июля в двух секторах у берегов Крыма и в конце съемки – в Кавказском и Керченском секторах. Личинки *T. mediterraneus* в количестве 111 экз. были собраны только у берегов Кавказа и в Керченском секторе. Среди личинок *E. encrasicolus,* как у берегов Крыма, так и у берегов Кавказа доминировали личинки на желточном типе питания, составляя 87 и 74% соответственно. В Керченском секторе в пробах преобладали личинки *E. encrasicolus* на внешнем типе питания, составляя 44%, доля личинок на желточном типе питания не превышала 33% (рис. 4).

Питание исследовано у 56 личинок *E. encrasicolus* длиной от 6.1 до 11.4 мм. У 18 личинок найдены сильно переваренные пищевые объекты, представленные ювенильными стадиями копепод (Calanoida). Их количество в пищевом комке варьировало от 1 до 4 экз. на один кишечник, длина изменялась от 0.15 до 0.275 мм. У остальных личинок в кишечниках обнаружена только аморфная масса, что характерно для данного вида [7, 8].

В районе Кавказа личинки *T. mediterraneus* представлены всеми размерными группами. Доминировали личинки на смешанном типе питания, доля которых составила 66% общей численности. Доля личинок на желточном типе питании была 24%, на внешнем – 10%. Кроме личинок у берегов Кавказа пойман один экземпляр молоди *T. mediterraneus* длиной 18.3 мм и весом 38.5 мг. В Керченском секторе доминировали личинки *T. mediterraneus* на желточном типе питания, крупные личинки в сборах отсутствовали (см. рис. 4).

Питание личинок *T. mediterraneus* исследовано у 58 экз. длиной 2.4–10.2 мм, собранных в Кавказском секторе. У 48 экз. со смешанным типом питания (длина 2.3–5.5 мм) в кишечниках обнаружены копеподы (Calanoida) ювенильных стадий, на долю которых приходилось 86% общего количества потребленных организмов, доля кладоцер составила 14%. В кишечниках доминировали ювенильные стадии копепод (Calanoida),

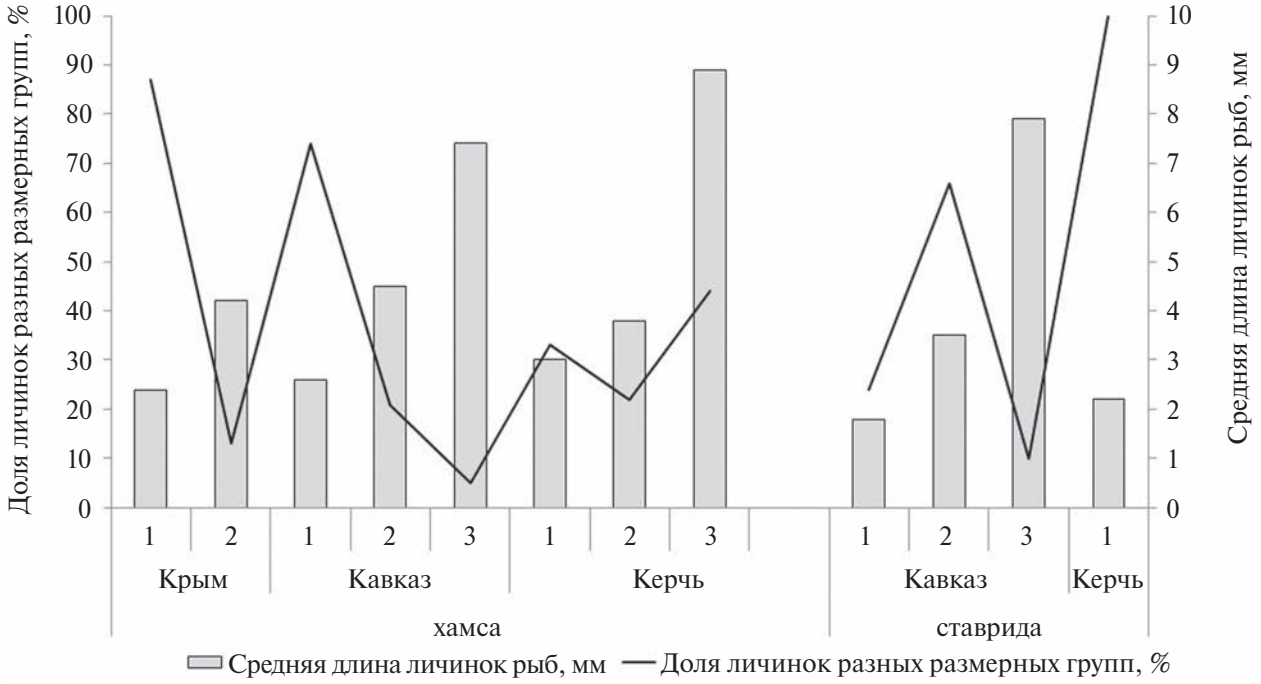

Рис. 4. Процентное соотношение личинок разных размерных групп *E. encrasicolus* и *T. mediterraneus* (% общего количества), средняя длина (мм) личинок рыб по группам.

среди которых преобладала *Acartia* (*A. tonsa* + *A. clausi*). Вклад других видов копепод: *Paracalanus parvus* и *Pseudocalanus elongatus* был низким, среди кладоцер доминировала *Penilia avirostris.* Размеры кладоцер в кишечниках личинок изменялись от 0.2 до 0.5 мм. Количество пищевых объектов варьировало от 1 до 3 экз. на один кишечник. Длина копепод колебалась от 0.1 до 0.375 мм, при этом мелкие копеподы длиной не более 0.2 мм составляли до 70%.

У 10 личинок *T. mediterraneus* на внешнем типе питания длиной 5.8–10.2 мм и весом 1.8–8.7 мг в кишечнике доминировали ювенильные стадии копепод (Calanoida), составляя 62% общего количества потребленных объектов. Длина копепод варьировала от 0.1 до 1.125 мм, доминировали копеподитные стадии длиной около 0.4 мм. Доля кладоцер в рационе личинок возросла до 38%. Количество пищевых объектов варьировало от 1 до 4 экз. на один кишечник.

Кормовой зоопланктон. В период исследований в зоопланктоне обнаружено 25 таксонов, среди них преобладали кормовые организмы рыб. В районе Крымского полуострова средняя численность кормового зоопланктона была 526.78 экз/м^3, средняя биомасса – 39.45 мг/м^3. Доминировали копеподы, составляя 91.4% общей численности кормовых организмов, доля личинок бентосных организмов была 3.1%, доля кладоцер не превышала 1.5% (табл. 2).

У берегов Кавказа средняя численность кормового зоопланктона оказалась в 5.6 раз выше, чем у берегов Крыма, и составила 2965.9 экз/м^3 (см. табл. 2). Средняя биомасса кормового зоопланктона составляла 124 мг/м^3, что втрое превышало ее величину у берегов Крыма. В пробах зоопланктона преобладали кладоцеры и копеподы, составляя соответственно 46 и 43% общей численности всех кормовых организмов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Нерест тепловодных видов рыб в Черном море обычно начинается при повышении температуры воды выше 13°С. Основным фактором, влияющим на начало массового результативного нереста, является благоприятная температура верхнего слоя моря (18–26°С) и формирование вертикальной термической стратификации вод летнего типа, поскольку тепловодные виды рыб размножаются только в верхнем хорошо прогретом квазиоднородном слое [6].

Первый этап ихтиопланктонной съемки выполнялся в районе Крымского полуострова в период с 29 июня по 7 июля 2021 г. в начальной фазе летнего гидрологического сезона. На шельфе Крымского полуострова были отмечены икра и личинки 13 видов рыб из 11 семейств, а в глубоководной акватории – 7 видов из 6 семейств. Интенсивность нереста тепловодных видов рыб

Таблица 2. Средняя численность, биомасса основных групп зоопланктона и средняя масса одного экземпляра в каждой таксономической группе

Таксон	Район Крымского полуострова, конец июня–июль		Район у побережья Кавказа, август	
	Численность, экз/м^3	Биомасса, мг/м^3	Численность, экз/м^3	Биомасса, мг/м^3
Копеподы	481.61	30.814	1098.93	57.289
Средняя масса, мг/экз.	0.0640		0.0521	
Кладоцеры	7.64	0.210	1510.75	53.506
Средняя масса, мг/экз.	0.0275		0.0354	
Oikopleura dioica	23.48	0.017	26.53	0.017
Средняя масса, мг/экз.	0.0007		0.0007	
Parasagitta setosa	6.05	8.337	105.08	12.698
Средняя масса, мг/экз.	1.3773		0.1208	
Личинки бентосных животных	7.99	0.067	224.64	0.676
Средняя масса, мг/экз.	0.0084		0.0032	
Кормовой зоопланктон	526.78	39.445	2965.94	124.189
Средняя масса, мг/экз.	0.0749		0.0419	
Средняя поверхностная температура моря, °С	24.81		27.75	

была еще низкой. Одновременно продолжался нерест трех умеренноводных видов, доля их икры составляла 12.4%, личинок – 10%. Средняя численность икры на шельфе составляла 32.3 экз/м^2, а в глубоководной акватории – 28.6 экз/м^2. Численности личинок на шельфе и в глубоководной части моря были сопоставимы, составляя 3.1 и 3.3 экз/м^2 соответственно. Индекс видового сходства ихтиопланктона [38] в шельфовой и глубоководной зонах исследований составлял 0.60. В данном районе исследований сопоставимое количество видов в ихтиопланктоне наблюдалось и в начальной фазе летнего гидрологического сезона 2018 г., когда во второй-третьей декадах июня в ихтиопланктоне были отмечены 12 видов икры и личинок рыб. Однако если численность личинок была вполне сопоставима с данными 2021 г. и в среднем составляла 2.9 экз/м^2, то численность икры была вдвое меньше и не превышала 15 экз/м^2 [34].

Несмотря на то что у Крымского полуострова ТПМ на первом этапе съемки 2021 г. была благоприятной для нереста тепловодных видов рыб, активизация атмосферных процессов, а также усиление ветра и волнения моря привели как к замедлению процесса формирования термодинамических условий, благоприятных для начала результативного нереста теплолюбивых видов рыб, так и к повышению доли мертвой икры в пробах [6, 12]. При увеличении волнения моря до 4–5 б смертность икры в верхнем слое моря может достигать 85% [21]. У Крымского полуострова 29–30 июня 2021 г. при волнении моря 1–2 б доля мертвой икры *E. encrasicolus* составляла 60%, а в период с 1 по 7 июля при усилении волнения до 3–4 б она возросла до 77%.

Второй этап съемки проводили в прибрежно-шельфовой зоне и глубоководных районах северо-восточной акватории моря у берегов Кавказа в период с 30.07 по 07.08.2021 г. Гидрологический режим соответствовал периоду развитого летнего гидрологического сезона с устоявшейся вертикальной термической структурой вод. Количество видов ихтиопланктона на шельфе и в глубоководной зоне у берегов Кавказа было вполне сопоставимо – 16 и 14 соответственно. Индекс видового сходства [38] составлял 0.66. Средняя численность икры на шельфовых и глубоководных станциях составляла 159.6 и 160.9 экз/м^2. Доля мертвой икры в пробах была 58%. При этом средняя численность личинок на шельфе составляла 452 экз/м^2, что в 4.7 раза выше, чем в глубоководной зоне, а максимальная численность достигала 936 экз/м^2. Вероятно, личинки были вынесены в прибрежно-шельфовую зону струей ОЧТ. Нерестовая активность тепловодных видов рыб, как на шельфе, так и в открытых водах, оказались существенно выше ранее отмеченных в данном районе

исследований [33]. При аналогичных гидрологических условиях в последней декаде июля 2019 г. в районе Кавказа в ихтиопланктоне были отмечены 14 видов рыб, средняя численность икры была в 1.8, личинок – в 13.6 ниже, чем в августе 2021 г. Максимальная численность икры и личинок наблюдалась в зоне прибрежно-шельфовых вод с пониженной соленостью, где она составляла 330 и 148 экз/м^2 соответственно [33].

В конце второго этапа съемки (7–9 августа) ихтиопланктон собирали в Керченском секторе в условиях выхода на восток Черного моря активного малоподвижного циклона [15] и усиления волнения моря до 4 б. Несмотря на благоприятные температурные условия, нерестовая активность тепловодных видов рыб резко снизилась. Средняя численность икры (38.9 экз/м^2) оказалась сопоставимой с таковой у берегов Крыма (сектора ЮБК и восточный), где съемка выполнялась в начале июля в период усиления волнения в открытой части моря. Доля мертвой икры у доминирующей в пробах *E. encrasicolus* в Керченском секторе возросла до 70%.

Для сравнения таксономического сходства ихтиопланктонных комплексов пяти секторов исследований был проведен кластерный анализ методом попарного внутригруппового невзвешенного среднего (UPGMA) [37]. Распределение кластеров на дендограмме определялось особенностями термодинамического состояния вод в процессе выполнения съемки (рис. 5).

Максимальный уровень таксономического сходства ихтиопланктона наблюдается у секторов ЮБК и Восточный по причине их региональной близости, соответствию единой фазе формирования термической структуры вод, а также степени ветрового волнения в процессе выполнения съемки. Близость Керченского сектора исследований, выполненного в августе, с ЮБК и Восточным, выполненными в начале июля, связана с аналогичными периодами ветро-волнового состояния вод. Во время выполнения ихтиопланктонной съемки в данных районах наблюдались периоды усиления волнения в открытой части моря с 1–2 до 4 б в результате выхода на Черное море двух циклонов с 5 по 9 июля и с 7 по 16 августа, которые привели к усилению волнения моря.

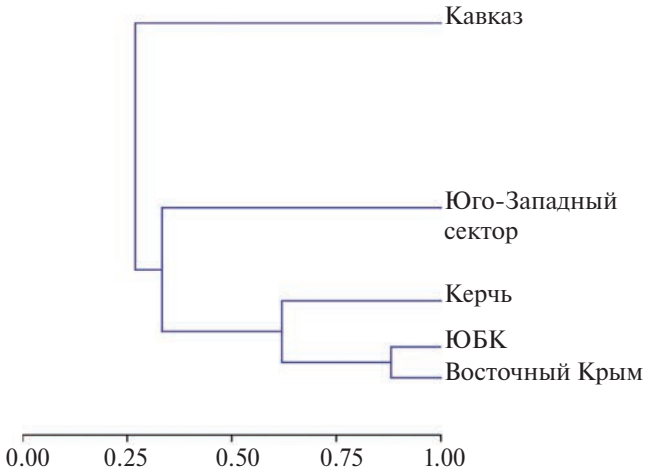

Рис. 5. Дендрограмма таксономического сходства ихтиопланктонных комплексов в 5 секторах исследований (метод UPGMA, индекс сходства Брея–Кёртиса [37]).

Инерционная трансформация ОЧТ в ярко выраженный поток у берегов Кавказа, совпала с массовым нерестом тепловодных видов рыб, что привело к увеличению разнообразия видов и высокой численности ихтиопланктона (см. рис. 5). Из отдельно стоящей группы кластеров района Крымского полуострова к кластеру Кавказа примыкает не территориально близкий Керченский, а Юго-Западный, что, вероятно, связано с минимальным волнением моря в данных районах исследований.

Высокая численность личинок рыб в прибрежно-шельфовой зоне у берегов Кавказа сопровождалась высокой численностью кормового зоопланктона (до 3000 экз/м^3), что, вероятно, было обусловлено их выносом из глубоководных районов струей ОЧТ. В процессе развития летнего нерестового сезона произошло перераспределение вклада основных видов кормового зоопланктона. В районе Крымского полуострова по численности и биомассе доминировали копеподы, в районе Кавказа основное увеличение численности кормового зоопланктона произошло за счет кладоцер, численность которых была на два порядка выше, чем у берегов Крыма. Максимальная численность кладоцер в Черном море обычно приходится на август и совпадает с сезонным максимумом поверхностной температуры, что наблюдалось у берегов Кавказа. Повышенные температуры способствовали активному размножению бентосных организмов, личинки которых в массе появились в планктоне у берегов Кавказа, их доля в общей численности кормового зоопланктона составляла 7.6%.

В начале ихтиопланктонной съемки в районе Крыма и в конце съемки в районе Кавказа количество пищевых объектов в пищевом комке личинок рыб варьировало от 1 до 4 экз. на один кишечник. У личинок *E. encrasicolus* встречались ювенильные стадии копепод (Calanoida), преобладающие в кормовом зоопланктоне.

Пищевой спектр личинок *T. mediterraneus* был расширен за счет вклада кладоцер, которые, как и копеподы, преобладали в кормовом зоопланктоне. У личинок *T. mediterraneus* на смешанном типе питания, пойманных в районе Кавказа, в кишечниках доминировали ювенильные стадии копепод (Calanoida), составляя 86%, доля кладоцер – 14% общего количества потребленных организмов. Длина большинства потребленных организмов не превышала 0.2 мм. С переходом на внешний тип питания доля кладоцер в пищевом комке личинок *T. mediterraneus* возросла до 38%, наблюдалось увеличение средней длины пищевых объектов до 0.4 мм. В августе 2021 г. доля мелких кладоцер и копепод в пищевом комке личинок *T. mediterraneus* была значительно выше, чем летом 2019 г. [41]. В 1990-е гг., в период массового развития гребневика *Mnemiopsis leidyi* – хищника и конкурента в питании личинок и молоди рыб, при низкой численности мелкоразмерной фракции кладоцер и копепод, личинки рыб переходили на питание другими доступными кормовыми организмами, в том числе пелагическими личинками донных гидробионтов [25]. В период ихтиопланктонной съемки 2021 г. пелагические формы бентосных гидробионтов в кишечниках личинок рыб не встречались, видимо, данный корм является вынужденным и используется в питании личинок только при отсутствии основных объектов питания – копепод и кладоцер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активизация атмосферных процессов над восточной половиной Черного моря в июне–июле 2021 г., чередование периодов активного прогрева верхнего слоя Черного моря с периодами усиления ветрового волнения привели к замедлению процесса формирования термодинамических условий, благоприятных для начала нереста тепловодных видов рыб. В результате, начало летнего нерестового сезона сдвинулось на аномально поздний срок – первую декаду июля. В районе Крымского полуострова в начальной фазе летнего гидрологического сезона были отмечены 13 видов рыб. Средняя численность икры составляла 29.1, личинок – 2.0 экз/м^2. Максимальная численность икры и личинок наблюдалась в секторе ЮБК – 37.3 и 2.5 экз/м^2 соответственно. В районе Кавказа при устойчивом состоянии параметров летнего гидрологического сезона с максимальным прогревом верхнего слоя моря и сформировавшейся вертикальной термической стратификацией вод летнего типа в ихтиопланктоне отмечены 20 видов икры и личинок рыб, их средняя численность составляла 159.6 и 160.9 экз/м^2 соответственно.

Усиление ветрового волнения в процессе выполнения исследований у Крымского полуострова привело к увеличению смертности икры *E. encrasicolus* с 60% при волнении 1–2 б до 77% – при 3–4 б. У берегов Кавказа при волнении 1–2 б смертность икры *E. encrasicolus* в среднем составляла 58%, в секторе Керчи при волнении 3–4 б – увеличилась до 70%.

Кластерный анализ показал, что сходство таксономического состава ихтиопланктона различных секторов исследований определялось особенностями термодинамического состояния вод в процессе выполнения съемки. На этом фоне максимальная близость отдельных кластеров, вне зависимости от района, определялась интенсивностью ветрового волнения в процессе съемки.

В районе Крымского полуострова при неустановившейся циркуляции поверхностных вод в начальной фазе формирования вертикальной термической структуры вод летнего типа отмечается квазиоднородное распределение численности икры и личинок рыб в шельфовых и глубоководных районах моря.

В районе Кавказского сектора исследований ветровая “накачка” верхнего слоя моря в процессе усиления циклонической деятельности в июне–июле 2021 г. в начале первой декады августа привела к существенной перестройке поверхностной циркуляции вод на исследуемой акватории. Трансформация ОЧТ в сплошной поток со скоростями до 30–35 м/с и его смещение на кромку шельфа вдоль Кавказского побережья вплоть до Керченского пролива не повлияли на нерестовую активность массовых промысловых видов рыб. Средняя численность икры на шельфе и в глубоководной зоне была сопоставима и составляла около 160 экз/м^2. В то же время за счет смещения струи ОЧТ в прибрежно-шельфовую зону средняя численность личинок рыб достигла 452 экз/м^2, что почти в 5 раз превышало таковую в глубоководной зоне, их максимальная численность составила 936 экз/м^2.

Анализ спектра питания разноразмерных личинок рыб показал, что наиболее благоприятные условия питания наблюдались у берегов Кавказа. В этом районе преобладали мелкоразмерные фракции копепод и кладоцер, а их численность и биомасса были значительно выше, чем у Крымского полуострова, что совокупно благоприятствовало выживанию личинок рыб.

Благодарности. Авторы выражают благодарность научным сотрудникам отдела функционирования морских экосистем вед. н. с., к. б. н. Мельникову В.В. и м. н. с. Чудиновских Е.С. за сбор ихтиопланктонных проб в рейсе и вед. инж. отд. планктона Поповой Е.А. за помощь в обработке зоопланктонных проб.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственных заданий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН" № 1023032000049-6-1.6.21 "Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения" (ихтио-, зоопланктонные и трофологические исследования) и № 1023032700554-2-1.6.16 "Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов в целях получения биологически активных веществ из гидробионтов" (гидрологические исследования).

Проведенные исследования были выполнены в Центре коллективного пользования НИС "Проф. Водяницкий" Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белокопытов В.Н., Никольский Н.В.* Устойчивые антициклонические вихри у южного и западного побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2015. Вып. 1. С. 47–53.
2. *Белокопытов В.Н.* Климатические изменения гидрологического режима Черного моря: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Севастополь: МГИ, 2017. 42 с.
3. *Гавриков А.В., Зовина О.В., Разоренова О.А. и др.* Экстремальные осадки в июне 2021 г. над Черным морем в контексте их долгопериодной климатической изменчивости // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 357–364. https://doi.org/10.31857/S0030157422030054
4. *Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А.* Климатические изменения гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980–2020 гг.) // Океанология. 2021. Т. 61. № 6. С. 900–912. https://doi.org/10.31857/S003015742106006X
5. *Дехник Т.В.* Ихтиопланктон Черного моря. Киев: Наукова думка, 1973. 234 с.
6. *Дехник Т.В.* Динамика численности, выживания и элиминации икринок и личинок массовых рыб // Основы биологической продуктивности Черного моря / Ред. В.Н. Грезе. Киев: Наукова думка, 1979. С. 272–279.
7. *Дука Л.А.* Питание личинок черноморской хамсы // Труды Севастоп. биол. ст. 1961. Т. 14. С. 242–256.
8. *Дука Л.А., Синюкова В.И.* Руководство по изучению питания личинок и мальков морских рыб в естественных и экспериментальных условиях. Киев: Наукова думка, 1976. 133 с.
9. *Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Пиотух В.Б. и др.* Формирование прибрежного течения в Черном море из-за пространственно-неоднородного ветрового воздействия на верхний квазиоднородный слой // Океанология. 2008. Т. 48. № 2. С. 176–192.
10. *Зацепин А.Г., Ёлкин Д.Н., Корж А.О. и др.* О влиянии изменчивости течения в глубоководной зоне Черного моря на динамику вод узкого северокавказского шельфа // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 3. С. 16–25. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-3-16-25
11. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
12. *Кошелев Б.В.* Экология размножения рыб. М.: Наука, 1984. 309 с.
13. *Маркова Н.В., Белокопытов В.Н., Дымова О.А., Миклашевская Н.А.* Оценка климатических полей температуры и солености вод Черного моря для современного периода (1991–2020) // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37. № 4. С. 423–435.
14. *Морозов А.Н., Маньковская Е.В.* Холодный промежуточный слой Черного моря по данным экспедиционных исследований 2016–2019 годов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 5–16.
15. Морской портал. МГИ РАН. http://dvs.net.ru/mp/index_ru.shtml [дата обращения: 01.06.2022]
16. *Одум Ю.* Экология. Москва: Мир, 1986. Т. 2. 373 с.
17. Определитель фауны Черного и Азовского морей. Киев: Наук. думка, 1969. Т. 2. 536 с.
18. Определитель фауны Черного и Азовского морей. Киев: Наук. думка, 1972. Т. 3. 331 с.
19. *Подымов О.И., Зацепин А.Г., Очередник В.В.* Рост солености и температуры в деятельном слое северо-восточной части Черного моря с 2010 по 2020 г. // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37. № 3. С. 279–287. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-279-287
20. *Полонский А.Б., Серебренников А.Н.* О механизме резкого понижения температуры поверхности в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма // Метеорология и Гидрология. 2023. № 2. С. 31–40.

21. *Ревина Н.И.* К вопросу о размножении и выживании икры и молоди крупной ставриды в Черном море // Труды Азово-Черномор. НИИ мор. Рыб. Хоз-ва и океанографии. 1958. Вып. 7. С. 9–10.

22. *Синюкова В.И.* Питание личинок черноморской ставриды // Тр. Севастоп. биол. ст. 1964. Т. 15. С. 302–325.

23. Современное состояние ихтиофауны Черного моря / Ред. С.М. Коновалов. Севастополь: Экосигидрофизика, 1995. 214 с.

24. *Титов В.Б.* Характеристика Основного Черноморского течения и прибрежных антициклонических вихрей в Российском секторе Черного моря // Океанология. 2002. Т. 42. № 5. С. 668–676.

25. *Ткач А.В.* Питание личинок черноморских рыб // Современное состояние ихтиофауны Черного моря: сб. науч. трудов НАН Украины / Ред. С.М. Коновалов. Севастополь: ИнБЮМ, 1996. С. 153–168.

26. *Трощенко О.А., Субботин А.А.* Абиотические факторы и условия обитания гидробионтов прибрежной зоны Юго-Восточного Крыма. Гидрологические особенности / Ред. Н.С. Костенко. Биология Черного моря у берегов Юго-Восточного Крыма. Симферополь: АРИАЛ, 2018. С. 46–59.

27. *Филлипс О.М.* Динамика верхнего слоя океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 319 с.

28. *Arashkevich E.G., Drits A.V., Timonir A.G., Krementsky V.V.* Variability of Spatial Zooplankton Distribution Affected by yhe Water Dynamics in the Northeastern Part of the Black Sea // Oceanology. 2002. V. 42. S. 1. P. S79–S94.

29. *Auth T.D., Daly E.A., Brodeur R.D., Fisher J.L.* Phenological and distributional shifts in ichthyoplankton as sociated with recent warming in the northeast Pacific Ocean // Global Change Biology. 2017. V. 24 (11). P. 259–272.

30. *Klimova T.N.* Dynamics of Species Composition and Numbers of Ichthyoplankton of the Black Sea in the Area of the Crimea in the Summer Periods of 1988–1992 // J. of Ichthyology. 1998. V. 38. № 8. P. 645–651.

31. *Klimova T., Podrezova P.* Seasonal distribution of the Black Sea ichthyoplankton near the Crimean Peninsula // Regional studies in Marine Science. 2018. V. 24. P. 260–269.

32. *Klimova T.N., Subbotin A.A., Vdodovich I.V. et al.* Distribution of Ichthyoplankton in Relation to Specifics of Hydrological Regime off the Crimean coast (the Black Sea) in the Spring–Summer Season 2017 // J. of Ichthyology. 2021. V. 61. № 2. P. 259–269.

33. *Klimova T.N., Subbotin A.A., Podrezova P.S., Kurshakov S.V.* Ichthyoplankton of the Black Sea during the Period of Mass Spawning of Warm-Water Fish Species // Oceanology. 2022. V. 62. № 4. P. 517–527.

34. *Klimova T.N., Podrezova P.S., Subbotin A.A. et al.* Ichthyoplankton of the Black Sea at the Beginning of the Summer Spawning Season 2018 // Water Resources. 2022. V. 49. № 3. P. 493–502.

35. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V.* Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem // J. of Marine Systems. 2016. V. 163. P. 80–94.

36. *Oguz T.* Controls of Multiple Stressors on the Black Sea Fishery // Frontiers in Marine Science. 2017. V. 4. P. 1–12.

37. *Romesburg H.C.* Cluster Analysis for Researchers. Robert E. Krieger Pub. Co. Florida, USA. 1990. 334 p.

38. *Sörensen T.* A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content // Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Biol. krifter. Bd V. 1948. № 4. P. 1–34.

39. *Turan C., Erguden D., Gürlek M.* Climate Change and Biodiversity Effects in Turkish Seas // Natural and Engineering Sciences. 2016. V. 1. № 2. P. 15–24.

40. WoRMS Editorial Board. 2021. World register of marine species.
https: www.marinespecies.org/index.php (Version 02/2022)

41. *Zagorodnyaya Yu.A., Vdodovich I.V., Pjdrezova P.S., Klimova T.N.* Species composition and feeding of the fish larvae in the northern part of the Black Sea in July–August 2019 // J. of Ichthyology. 2022. V. 62. № 6.

P. 1042–1052.

FEATURES OF THE DISTRIBUTION OF THE BLACK SEA ICHTHYOPLANKTON IN THE CONDITIONS OF ACTIVATION OF ATMOSPHERIC PROCESSES IN THE SUMMER HYDROLOGICAL SEASON OF 2021

T. N. Klimova[a, *], A. A. Subbotin[a], I. V. Vdodovich[a], J. A. Zagorodnyaya[a], D. A. Zabrodin[a]

[a] A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, IBSS, Sevastopol, Russian Federation

** e-mail: tnklim@mail.ru*

The species diversity, abundance and distribution features of ichthyoplankton and fodder zooplankton in the northern part of the Black Sea in the summer of 2021 are presented. The intensification of cyclonic activity over the Black Sea in June-July slowed down the process of formation of the summer type of thermal stratification of waters in the studied water area. At the beginning of July, only 13 species of eggs and fish larvae were observed in the ichthyoplankton of the Crimean Peninsula, and their average numbers were 29 and 2 ind/m^2, respectively. At the beginning of August, the summer-type vertical thermal stratification of waters off the coast of the Caucasus has already formed. The number of ichthyoplankton species has increased to 20. Activation of atmospheric processes in June-July intensified the intra-seasonal wind "pumping" of the upper layer of the sea. The main Black Sea current transformed into a pronounced stream over the continental slope, oriented alongshore, partially extending to the shelf. This did not affect the spawning activity of mass fish species. The average number of eggs in the shelf and deep-water zone was about 160 ind/m^2, and the average number of larvae on the shelf was almost five times higher and amounted to 452 ind/m^2.

Keywords: ichthyoplankton, species diversity, spatial distribution, fodder zooplankton, feeding of fish larvae, hydrological regime, Black Sea

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 585–596

МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ

УДК 551.465

ДЕКАДНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТАКСОЦЕНОВ NEMATODA И HARPACTICOIDA В ЗАЛИВЕ БЛАГОПОЛУЧИЯ (КАРСКОЕ МОРЕ)

© 2024 г. Д. В. Кондарь[1, *], П. В. Лепихина[2], Л. А. Гарлицкая[3], А. А. Удалов[1], М. В. Чикина[1], В. О. Мокиевский[1]

[1] Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

[2] Doumo, Coimbra, Portugal

[3] Научный центр зоологии и гидроэкологии, Национальная академия наук Республики Армения, Ереван, 0014 Республика Армения

** e-mail: kondaria@gmail.com*

Поступила в редакцию 10.11.2023 г.
После доработки 28.01.2024 г.
Принята к публикации 18.04.2024 г.

Исследования двух основных компонентов мейобентоса – нематод и гарпактикоидных копепод, проведенные в 2013 и 2020 гг. в заливе Благополучия (Новая Земля, Карское море), выявили мозаичное распределение этих групп, обусловленное высоким видовым разнообразием и низкой встречаемостью большинства видов. Тем не менее показаны закономерности в изменении видовой структуры обоих таксоценов, связанные с двумя основными градиентами факторов среды – пространственным и глубинным, а также с мозаичностью распределения грунтов. За семь лет, прошедших между съемками в заливе Благополучия, численность нематод выросла в 3–10 раз, численность копепод – в 2–3 раза. Таксономическая перестройка у обеих групп отмечается как на уровне видов, так и на уровне семейств, при этом не отмечено различий в функциональной структуре таксоценов. Изменения могут быть связаны как с абиотическими факторами, так и с изменениями трофической системы залива вследствие вселения краба-стригуна *Chionoecetes opilio*.

Ключевые слова: нематоды, гарпактикоидные копеподы, многолетние изменения, арктические экосистемы, Карское море

DOI: 10.31857/S0030157424040033, **EDN:** PRYQVG

ВВЕДЕНИЕ

Мейофауна вносит существенный вклад в функционирование экосистем и играет важную роль в бентосных пищевых сетях [29]. Благодаря своим особенностям (малые размеры, высокая численность, короткое время генерации), мейофауна может быть удобным объектом для оценки изменений окружающей среды [13, 23]. Вариабельность окружающей среды особенно характерна для экосистем арктических фьордов и заливов, которые уникальны по ряду параметров, таких, как ярко выраженные сезонные изменения и переменный характер поступления органического углерода [15]. В то же время исследования мейобентоса в высокоширотных арктических фьордах и заливах в основном посвящены пространственному распределению фауны [21, 24] и ее сезонной динамике [27, 35, 37]; данные по многолетним изменениям сообществ мейобентоса в арктических экосистемах практически отсутствуют [14, 31].

В данной работе приведены первые данные о структуре и межгодовых различиях двух основных компонентов мейобентоса (нематод и гарпактикоидных копепод) в заливе Благополучия – одном из заливов архипелага Новая Земля (Карское море). Ранее качественный состав (на уровне крупных таксонов) и количественное распределение многоклеточного мейобентоса у восточного побережья архипелага Новая Земля были исследованы в районах захоронения радиоактивных отходов напротив заливов Абросимова и Степового, а также в южной части Новоземельской впадины [2, 12, 19, 28]. Видовой состав нематод и гарпактикоидных копепод здесь практически не изучен, в целом для Карского моря имеются подробные видовые списки только для центральной и восточной частей моря [3, 7].

В последнее время в западной части Карского моря и в заливах архипелага Новая Земля наблюдается перестройка донных сообществ [5, 8], обусловленная как климатическими изменениями, связанными с удлинением безледного периода, так и сопутствующей инвазией крупного хищника – краба-стригуна *Chionoecetes opilio* [4, 9, 39]. Данные видеонаблюдений 2020 г. показывают, что наибольшие плотности краба (около 70 экз/100 м^2) обнаружены именно в заливе Благополучия [1]. В этом заливе была выполнена единственная на данный момент работа, посвященная временным изменениям мейофауны Карского моря [5], показаны существенные изменения общих количественных характеристик мейобентоса с 2013 по 2020 г.

Целью данного исследования было проанализировать закономерности пространственного распределения и временной динамики таксоценов нематод и гарпактикоид, а также выявить факторы, их определяющие.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал собран в Карском море в сентябре 2013 г. в ходе 125-го рейса НИС “Профессор Штокман” и в сентябре 2020 г. в ходе 81-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”. В 2013 г. было выполнено семь станций, в 2020 г. – 5 станций на глубинах от 35 до 174 м вдоль трансекты от внутренней части залива Благополучия до прилегающей части склона Новоземельской впадины (рис. 1).

Для сбора проб мейофауны в 2013 г. использовали дночерпатель “Океан 0.1”, а в 2020 г. дночерпатель Ван-Вина 0.1 м^2 или бокс-корер площадью 0.25 м^2. На каждой станции пробы мейобентоса отбирали трубчатым пробоотборником площадью 3.14 см^2 на глубину 5 см от поверхности осадка. В 2013 г. отбирали три повторности на максимальном расстоянии друг от друга, которые в дальнейшем объединяли в одну интегральную пробу, в 2020 г. отбирали две повторности. Для

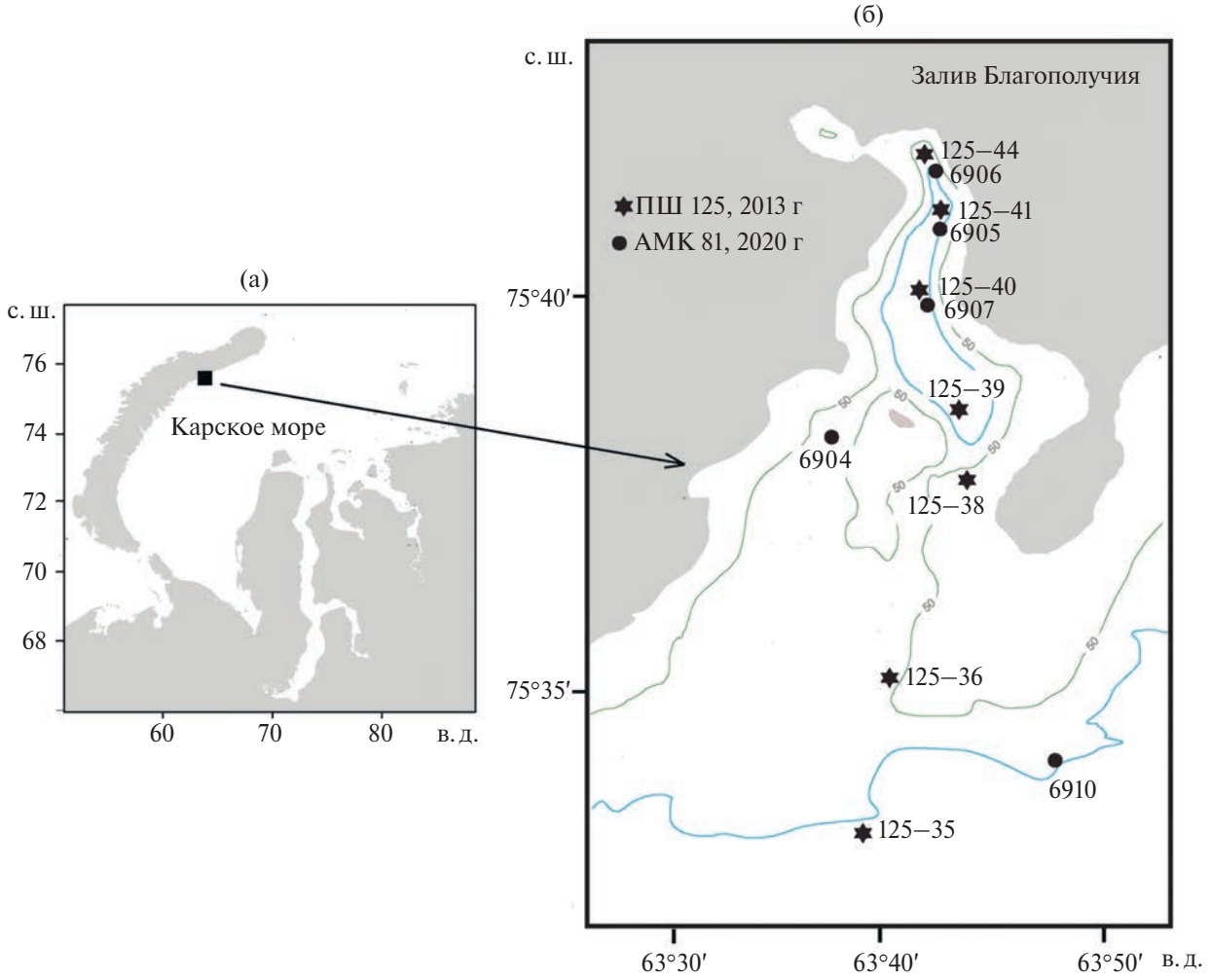

Рис. 1. Карта станций, выполненных в ходе 125-го рейса НИС “Профессор Штокман” (2013 г.) и 89-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” (2020 г.). (а) местонахождение залива, (б) расположение станций вдоль оси залива.

последующего анализа численность мейофауны в каждой пробе пересчитывали на площадь 10 см^2.

Образцы осадка фиксировали в 4% нейтральном формалине. Экстракцию организмов мейофауны из грунта проводили методом центрифугирования в градиенте плотности водного коллоидного раствора силикатов (LEVASIL®) [16]. Супернатант промывали через сито с диаметром ячеи 40 мкм. Извлеченные организмы были подсчитаны и идентифицированы до минимально возможного таксономического уровня. Для гарпактикоидных копепод в анализе не учитывали копеподитов. Названия таксонов приведены для нематод в соответствии с базой данных Nemys [26], для гарпактикоидных копепод – с базой данных WoRMS [38]. Для анализа функциональной структуры таксоценов использовали две общепринятые классификации жизненных форм и типов питания, построенные на анализе морфологических признаков. При этом виды копепод разделяли по жизненным формам в соответствии с морфологией и образом жизни [22] на илороющие, эпибентосные, интерстициальные и планктонные. Нематод разделяли по типам питания по схеме Визера [34], основанной на строении и вооружении ротовой полости.

На всех станциях были взяты образцы грунта для анализа гранулометрического состава, а также проведены измерения основных гидрологических параметров в придонном слое (соленость, концентрация растворенного кислорода, температура, мутность). Для оценки связности абиотических факторов был использован метод главных компонент (PCA – Principal Component Analysis).

Сходство между станциями оценивали с использованием индекса Брея–Кёртиса, распределение станций оценивали методом многомерного шкалирования (MDS). Для подтверждения различий в структуре таксоценов был применен тест PERMANOVA [17]. В целях выявления ведущих факторов среды, определяющих изменчивость структуры таксоценов нематод и копепод, был использован пошаговый регрессионный анализ методом последовательного присоединения (Distance-based linear models, DistLM) [25]. Поскольку распределение основных действующих факторов в заливе (изменения температуры, солености, концентрации кислорода, мутности, мощности стока) скоррелировано с двумя основными градиентами – глубинным (изменения температуры, солености, кислорода) и пространственным (положение на оси залива от кутовой части до открытого моря), а число проб было достаточно мало, в качестве основных параметров для анализа в модели были использованы индикаторы: глубина, линейное расстояние от кута залива, модальная фракция грунта и год.

Статистический анализ выполнен в программе PRIMER v.7 с дополнительным пакетом PERMANOVA+ [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Факторы среды

Параметры водной толщи изменялись как в зависимости от глубины и положения станций, так и между годами [5]. Температура придонного слоя воды в 2013 г. во внутренней котловине залива составляла от 1.3° до –1.5°C, во внешней части залива эти значения были несколько выше (–0.9°C). В 2020 г. наблюдалось увеличение температуры придонной воды в обеих частях залива Благополучия в среднем на 0.6°C. Значения температуры придонного слоя во внутренней котловине составили –0.5°C, во внешней части залива температура поднялась до –0.4°C. Параллельно несколько уменьшилась концентрация растворенного кислорода с 83–97% в 2013 г. до 79–85% в 2020 г. Мутность воды изменялась от 2 до 0.4 ЕМФ в 2013 г. и от 3.3 до 0.9 ЕМФ в 2020 г., при этом в оба года наблюдался выраженный градиент мутности от кутовой части залива в сторону открытого моря. Придонная соленость в оба года исследования по всему заливу составляла 34. Грунт на всех станциях представлял собой тонкие илы с модальным диаметром частиц 0.1–19 мкм. Исключение представляла собой наиболее мелководная станция 125–38, выполненная в 2013 г. на глубине 35 м и отличающаяся высокой положительной температурой (+0.3°C) и высокой долей песчаной фракции грунта (25%). Анализ методом главных компонент показал существенные различия двух съемок по гидрофизическим характеристикам придонного слоя воды (рис. 2) – в 2020 г. наблюдалось увеличение температуры придонной воды, увеличение мутности и снижение концентрации растворенного кислорода по сравнению с 2013 г.

Таксономическое разнообразие и численность

Нематоды и гарпактикоидные копеподы доминировали во всех пробах и суммарно составляли до 100% численности всего мейобентоса (станция 125–40). В 2013 г. численность нематод варьировала от 134 до 1756 экз/10 см^2, в среднем

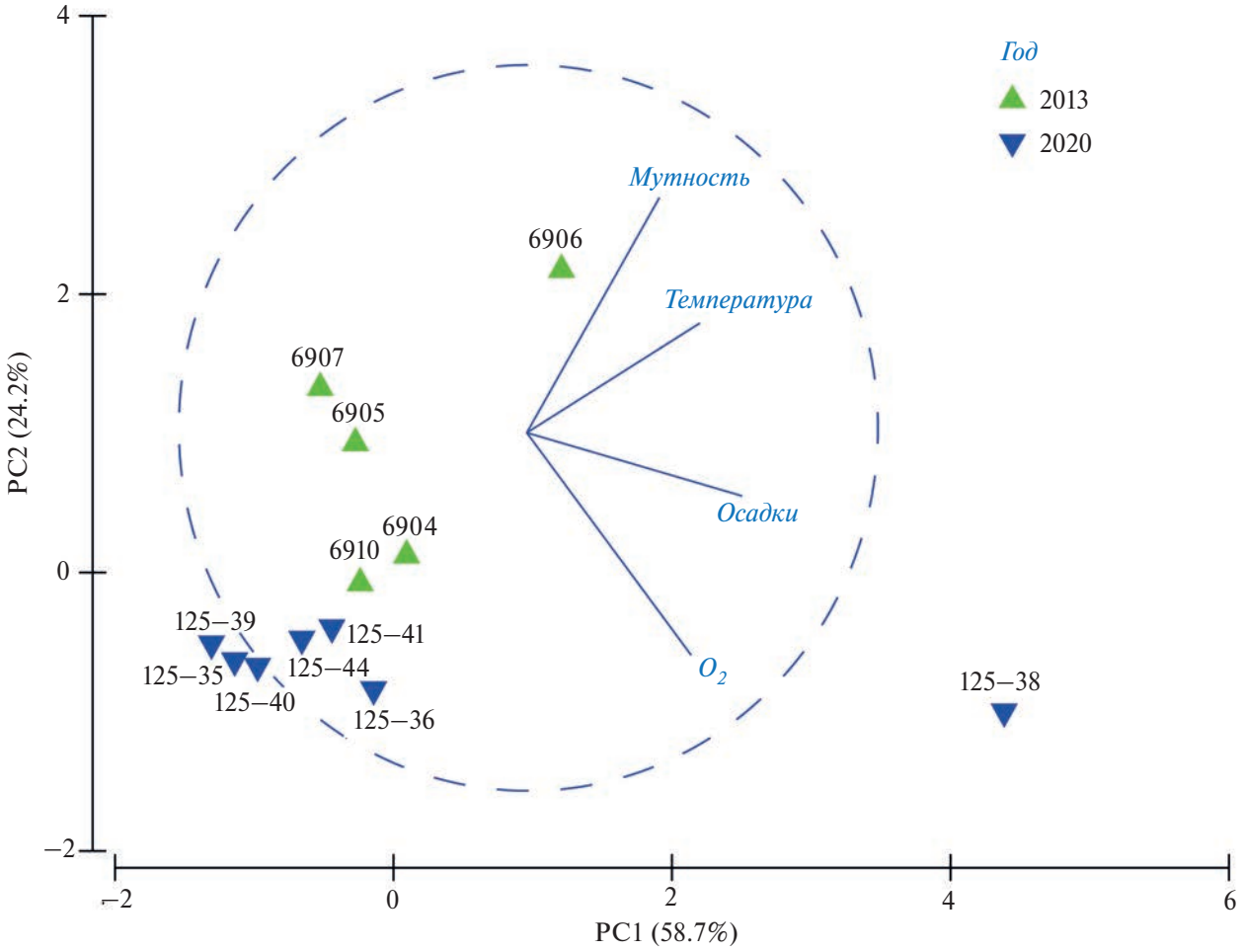

Рис. 2. Анализ абиотических факторов методом главных компонент (PCA).

составляя 653 экз/10 см^2 (рис. 3). В 2020 г. средняя численность по всей трансекте составила (2154 ± 1378) экз/10 см^2. Увеличение численности происходит от кутовой части залива в сторону внешнего склона. Численность гарпактикоид менялась в 2013 г. от 1 до 57 экз/10 см^2, в 2020 г. от 21 до 126 экз/10 см^2, в среднем составляя (75 ± 48) экз/10 см^2. На станции 125–38 не отмечено гарпактикоидных копепод, на станции 6905 не отмечено взрослых особей.

В 2013 г. в заливе Благополучия было обнаружено 107 видов нематод из 42 родов, принадлежащих 22 семействам. В среднем на станцию приходилось (39 ± 17) видов. В 2020 г. было обнаружено 153 вида нематод из 48 родов, принадлежащих 23 семействам. В среднем на станцию приходилось (79 ± 26) видов. Видовое разнообразие в оба года исследований было выше на станциях порога и внешней части залива.

В исследуемые годы в заливе Благополучия обнаружен 31 вид гарпактикоидных копепод, принадлежащих 11 семействам. В 2013 г. обнаружено 18 видов, в 2020 г. – 22 вида. Максимальное видовое разнообразие в оба года наблюдалось на станциях порога и внешней части залива.

Ожидаемое число видов (ES100) увеличивается по мере удаления от кутовой части залива и возрастает в 2020 г. для обеих групп (рис. 3).

Структура таксоценов

Таксоцены нематод и гарпактикоидных копепод в 2013 г. были распределены без выраженного градиента, мозаично (рис. 4). При этом для нематод станции внешней части залива (125–35 и 125–36) наиболее сходны. На этих станциях доминирует *Sabatieria* sp. 1, и из десяти массовых видов пять являются общими для обеих станций (*Sabatieria* sp. 1, *Microlaimus* sp. 2, *Monhystera* sp. 1, *Axonolaimus* sp. 1, *Dichromadora* sp. 1). Станции внутренней котловины существенно различаются между собой, каждая станция характеризуется своей локальной фауной. У гарпактикоидных копепод на наиболее близкой к кутовой части залива станции 125–44 взрослых особей не отмечено.

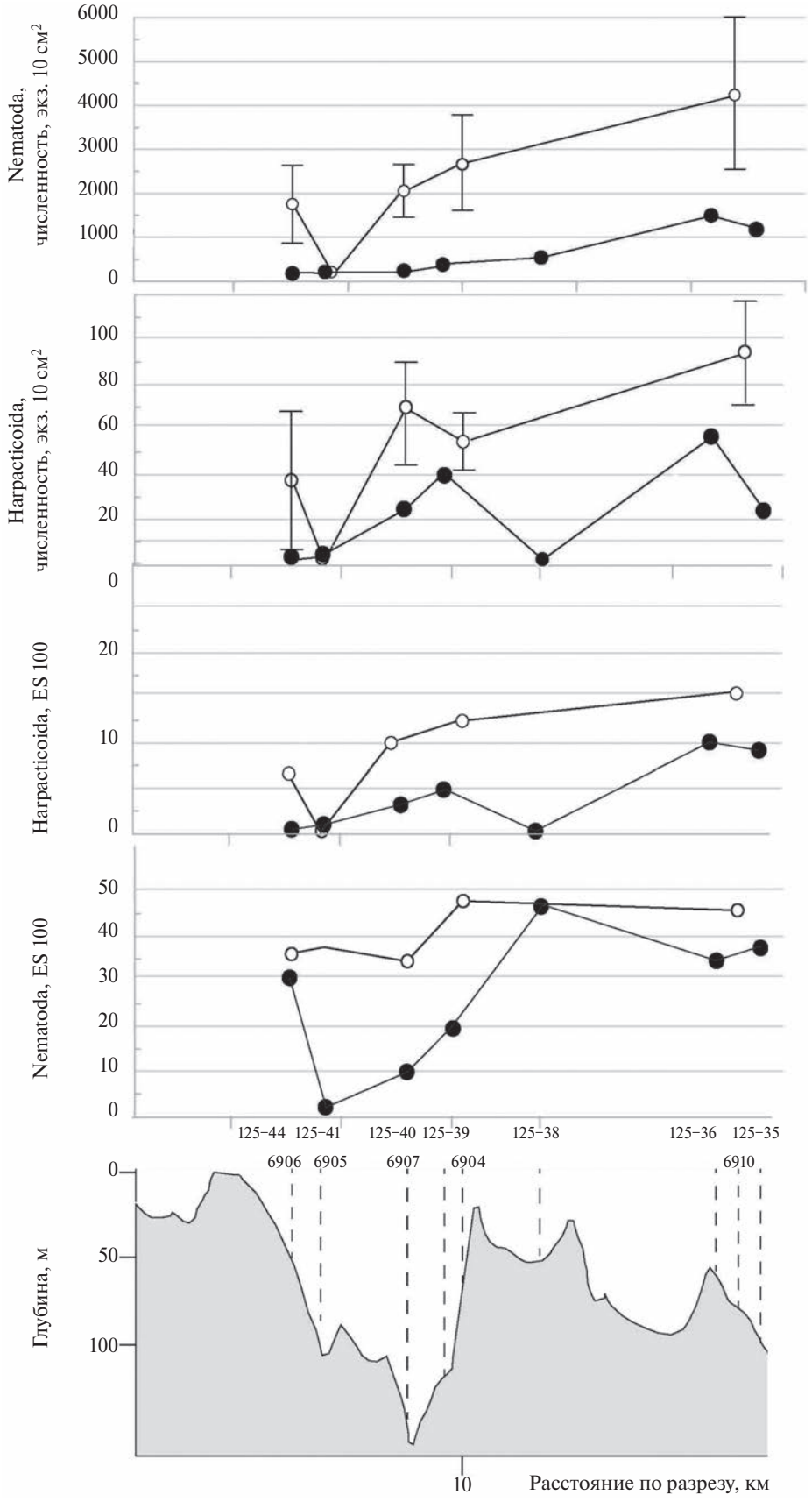

Рис. 3. Распределение численности и ожидаемого числа видов (ES100) по оси залива Благополучия в 2013 и 2020 гг. Черные круги – 2013 г., белые круги – 2020 г.

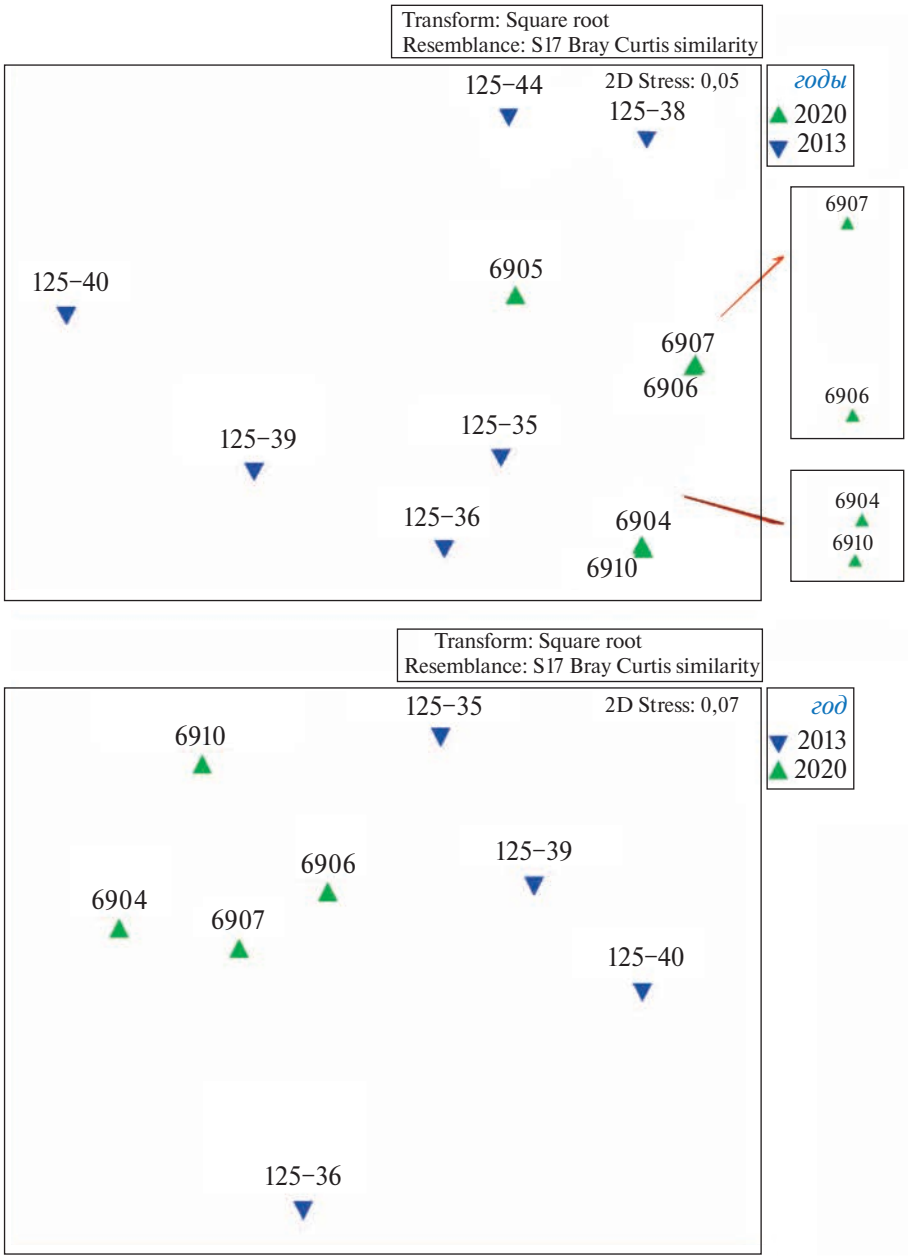

Рис. 4. Ординация станций по структуре такосоценов нематод (а) и гарпактикоид (б) методом MDS на основании значений индекса сходства Брея–Кёртиса, рассчитанного по численности.

На следующей по оси залива станции найден единственный экземпляр гарпактикоид (*Mucrosenia kendalli)*. Доминирующим видом по всему заливу является *Mucrosenia kendalli* (26–38% на всех станциях), субдоминантный вид – *Bradya* sp (в ряде случаев доминирующий на внутренних станциях). Плотность остальных видов крайне низка.

В 2020 г. в распределении нематод по заливу можно выделить две выраженные группы станций – сообщество нематод во внутренней котловине залива (ст. 6907 и 6906) и сообщество нематод на внешнем склоне и пороге (ст. 6904, 6910). Внутри залива в число массовых видов входили виды *Microlaimus* sp. 1, *Daptonema* sp. 1 и *Sabatieria ornata*; на внешнем склоне доминировали *Aegialoalaimus* sp. 1, *Halalimus* sp. 1, *Sabatieria* sp. 1.

Для гарпактикоидных копепод распределение сходно с 2013 г. По численности на всех станциях также доминирует *Mucrosenia kendalli* (20–50%), основные субдоминанты – *Danielssenia typica, Bradya* sp., *Ectinosoma* sp. При этом наблюдаются элементы градиента – доминирование *Mucrosenia kendalli* на станциях котловины выше (48–50%),

чем на станциях порога и внешнего шельфа (20–30%), в котловине выше доля субдоминанта *Bradya* sp. (17–20%).

Анализ PERMANOVA показывает достоверность межгодовых различий структуры таксоценов как для нематод ($p = 0.0292$), так и для гарпактикоид ($p = 0.0216$). Основной вклад в межгодовые различия у нематод вносят виды родов *Microlaimus, Daptonema* и *Sabatieria* (табл. 1). У гарпактикоид различия в видовой структуре между годами определяются не только увеличением численности двух массовых видов, отмеченных в оба года, но и появлением в 2020 г. новых видов *Danielssenia typica, Heteropsyllus* sp., *Heteropsyllus* cf *nanus, Delavalia islandica* (см. табл. 1).

Таблица 1. Виды, внесшие наибольший вклад в межгодовые различия. Результаты SIMPER-анализа (указаны виды, вклад которых более 1.5%)

Нематоды	**2013 г.**	**2020 г.**	
Вид	Av. Abundance	Av. Abundance	**Вклад, %**
Microlaimus sp. 1	1.57	13.47	8.19
Sabatieria ornata	7.91	5.66	6.82
Sabatieria sp. 1	11.79	3.46	6.2
Daptonema sp. 1	4.52	8.36	5.2
Dichromadora sp. 1	7.85	0.7	5
Axonolaimus sp. 1	5.02	0.65	3.37
Microlaimus sp. 2	4.05	4.32	2.77
Halalaimus sp. 4	3.9	1.28	2.39
Daptonema sp. 3	0.9	3.42	2.19
Monhystera sp. 1	2.89	2.4	2.18
Aegialoalaimus sp. 1	0.97	3.48	2.04
Halalaimus sp. 1	0.36	2.87	1.95
Subsphaerolaimus sp. 1	2.51	0.93	1.85
Гарпактикоиды	**2013 г.**	**2020 г.**	
Вид	Av. Abundance	Av. Abundance	**Вклад, %**
Mucrosenia kendalli	46.42	36.89	19.93
Bradya sp.	18.26	13.44	13.38
Danielssenia typica	0	9.69	8.53
Ectinosoma sp.	2.37	9.6	6.67
Mesocletodes cf. *parrirasus*	5	2.27	5.6
Eurycletodes monardi	4.21	0	3.71
Pseudoameira sp.	3.08	1.7	3.61
Heteropsyllus sp.	0	3.95	3.47

В обеих рассматриваемых нами группах достаточно велико количество видов с единичной встречаемостью. Для гарпактикоид оно составило 40% всех отмеченных видов, для нематод – 30.3%, поэтому изменения в таксономическом составе более показательны на уровне семейств (рис. 5).

На уровне семейств таксоцен нематод изменился между 2013 и 2020 гг. На смену доминирующим в 2013 г. семействам Comesomatidae и Chromadoridae пришли семейства Microlaimidae и Oxystominidae в 2020 г., при этом семейство Xyalidae было одним из трех самых массовых в оба года.

У гарпактикоидных копепод доминирующими по численности семействами в оба года являлись Pseudotachidiidae и Ectinosomatidae. В 2020 г. уменьшилась доля Argestidae, третьим по численности оказалось семейство Canthocamptidae и увеличилась доля Miraciidae.

Функциональная структура таксоценов

Межгодовое сравнение трофической структуры нематод показало, что соотношение трофических групп практически не изменилось (рис. 6). В процентном соотношении незначительно увеличилось обилие неизбирательных детритофагов (с 53 до 59%) и хищников (с 3 до 6%), тогда как обилие соскребывателей и селективных детритофагов снизилось (с 26 до 22% и с 17 до 11% соответственно) (см. рис. 6). По спектру жизненных форм гарпактикоид существенных изменений также не выявлено, в оба года преобладают эпибентосные и илороющие формы, при этом в 2020 г. немного уменьшается количество неспецифических интерстициальных видов.

Влияние факторов среды на структуру таксоценов

Выбранные факторы (расстояние по оси залива, глубина, тип грунта и год) суммарно объясняют 56.2% вариаций видовой структуры для нематод и 62.2% для гарпактикоид. При этом для обеих групп наиболее высокий вклад вносят межгодовые различия (19% вариаций видовой структуры для нематод и 26% для копепод). Расстояние по оси залива, отражающее изменение уровня ледникового и терригенного стока, осадконакопления и водообмена с морем, является важным фактором, определяющим различия таксономической структуры основных таксоценов мейобентоса (14.4 и 17.9% для нематод

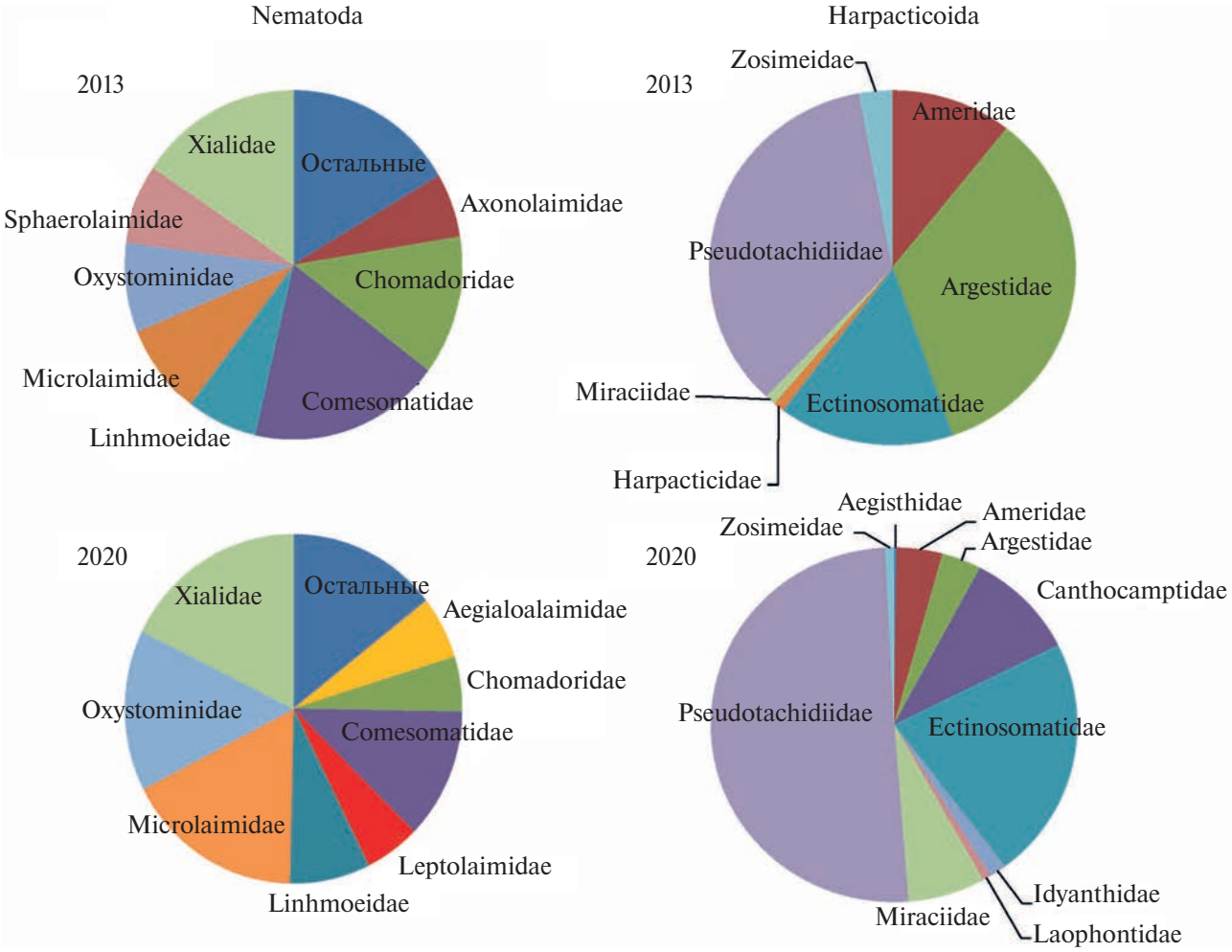

Рис. 5. Процентное соотношение численности гарпактикоид и нематод по семействам в 2013 и 2020 гг.

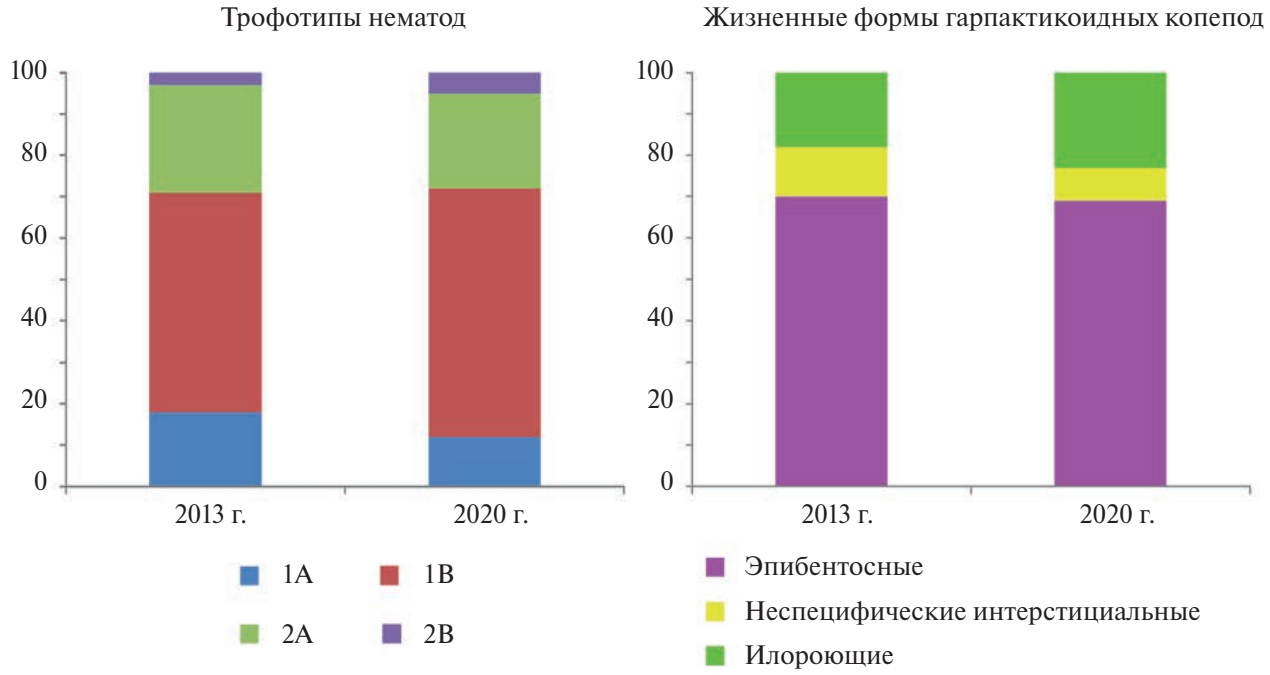

Рис. 6. Соотношение трофотипов нематод и жизненных форм гарпактикоид.

и гарпактикоид соответственно). Тип грунта и глубина объясняют меньшую долю вариаций видовой структуры (табл. 2). Таким образом, помимо межгодовых различий, наблюдается общее влияние двух основных пространственных градиентов, характерных для арктических фьордов – глубины и расстояния по оси залива, а также мозаичности грунта.

ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственная структура мейобентоса фьордов хорошо изучена. Основными драйверами как количественных изменений, так и изменений видового разнообразия являются глубина, а также характер и сила теригенного стока [24, 36]. Сильнее всего градиентные изменения структуры мейобентоса выражены в ледниковых фьордах – негативное влияние выражается в низкой плотности нематод и отсутствии гарпактикоид на станциях, расположенных вблизи ледников [21]. В заливе Благополучия, питание которого осуществляется во многом за счет стока ледника Налли, пространственный градиент в распределении как нематод, так и копепод выражен достаточно сильно. В кутовой части происходит существенное обеднение видового состава, на ряде станций гарпактикоиды отсутствуют. Для нематод обнаружены отличия сообществ внутренней и наружной частей залива в 2020 г., при этом тренд на увеличение численности и разнообразия нематод в сторону шельфа остается. Распределение таксоценов нематод и гарпактикоидных копепод в заливе Благополучия отличается высокой мозаичностью. В первую очередь это обусловлено высоким видовым разнообразием и низкой встречаемостью большинства видов. Это очень сильно затрудняет анализ, обычные приемы ординации и классификации не позволяют выявить четкие элементы пространственной структуры, вместе с тем, мы видим достоверные межгодовые различия для обоих таксоценов. Население нематод различалось между 2013 и 2020 гг. на уровне видов, родов и семейств. Процент общих видов составил 36.4%, общих родов – 39.6%. Доминирующие в 2013 г. семейства Comesomatidae и Chromadoridae в 2020 г. сменились семействами Microlaimidae и Oxystominidae, семейство Xyalidae было массовым в оба года. При этом изменений в трофической структуре нематод в заливе Благополучия между двумя годами исследований не обнаружено. В оба года доминируют нематоды, специализирующиеся на питании мелкими частицами осадка или бактериями, а также с выраженной ротовой полостью и вооружением в виде небольших зубов, что свидетельствует о широком спектре используемых пищевых объектов [34]. В таксоцене гарпактикоид различия зафиксированы как на уровне видов, так и на уровне семейств. Изменения обусловлены увеличением численности доминирующих видов – *Mucrosenia krendalli* и *Bradia* sp., а также появлением в 2020 г. новых, регулярно встречающихся видов – *Danielssenia typica* (на всех станциях), *Heteropsyllus* sp. (кроме станции, самой близкой к куту залива), *Heteropsyllus* cf. *nanus* (во внутренней и внешней части залива) и *Delavalia islandica* (на шельфе). Процент общих видов в 2013 и 2020 гг. составил 38.7%. В композиции жизненных форм гарпактикоид также не выявлено существенных различий, по всему заливу в оба года преобладают эпибентосные виды.

Таблица 2. Анализ связи факторов среды и распределения нематод и гарпактикоидных копепод (DistLM), * – высокие значения достоверности

Переменные	R^2	SS(trace)	Pseudo-F	P	Prop.
Nematoda					
+Year	0.18954	4173.2	2.1048	0.042*	0.18954
+Sediment	0.35143	3564.5	1.9969	0.0608*	0.16189
+Distance	0.49556	3173.4	2	0.0436*	0.14413
+Depth	0.5619	1460.8	0.90865	0.4998	0.066346
Harpacticoida					
+Year	0.25971	2827.7	2.1049	0.0298*	0.25971
+Distance	0.43877	1949.6	1.5953	0.1725	0.17906
+Depth	0.54103	1113.3	0.89115	0.5041	0.10225
+Sed	0.62199	881.49	0.64252	0.6616	0.08096

Причиной этих различий могут быть изменения абиотических параметров: в 2020 г. увеличились температура и мутность воды, снизилась концентрация кислорода в придонном слое (см. рис. 2). Среди мейобентосных гарпактикоид в заливе Благополучия преобладают эпибентосные виды (см. рис. 5), распространение которых ограничено верхними слоями осадков, что делает их чувствительными к снижению поступления кислорода [20]. В отличие от гарпактикоид, нематоды более устойчивы к изменениям [30], а некоторые способны мигрировать вглубь осадка или в толщу воды, чтобы пережить неблагоприятные условия среды [20, 32, 33], однако и у этого таксоцена отмечены изменения таксономической структуры.

Помимо действия абиотических факторов экосистема залива Благополучия трансформируется под действием инвазии краба-стригуна *Chionoecetes opilio*. Исследования мега- и макробентоса, проведенные в заливе Благополучия после вселения краба-стригуна показали значительные изменения в структуре донных сообществ [5, 10]. Реакция мейофауны на подобные природные стрессы изучена еще недостаточно. В устоявшихся представлениях мейобентос является пищевым объектом для большого количества макробентосных организмов [18] и изменения в трофической системе залива, в частности снижение давления макробентосных хищников (вследствие их частичного исчезновения) на копепод и нематод могут существенно снизить нагрузку на мейобентос. Таким образом, изменения, произошедшие в мейобентосе залива Благополучия могут являться как результатом биоценотической компенсации в ответ на уменьшение пресса непосредственных хищников [6, 11], так и результатом изменения гидрологического режима и скорости осадконакопления, связанных с климатическими изменениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределение таксоценов нематод и гарпактикоидных копепод в заливе Благополучия отличается высокой мозаичностью. В первую очередь это обусловлено высоким видовым разнообразием и низкой встречаемостью большинства видов. Тем не менее мы видим достоверные межгодовые различия для обоих таксоценов и наличие градиента видовой структуры. При этом в оба года изменения видовой структуры связаны с действием двух основных градиентов факторов среды – пространственным (расстояние от кута залива в сторону моря) и глубинным, а также с мозаичным распределением грунтов. Тренд на увеличение численности и разнообразия нематод из кутовой части залива в сторону шельфа, наблюдается в оба года исследований.

За семь лет, прошедших между двумя съемками в заливе Благополучия численность нематод выросла в 3–10 раз, численность копепод в 2–3 раза. Таксономическая перестройка у двух групп мейобентоса отмечается на всех таксономических уровнях, при этом изменения функциональной структуры отсутствуют.

Благодарности. Авторы благодарны академику М.В. Флинту за организацию экспедиций, экипажам НИС “Профессор Штокман” и НИС “Академик Мстислав Келдыш” за обеспечение работ. Авторы благодарны С.А. Щуке и Н.А. Беляеву за предоставление гидрологических данных и результатов анализа гранулометрического состава.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 23-27-00028).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галкин С.В., Залота А.К., Удалов А.А., Пронин А.А.* Оценка плотности популяций краба-вселенца Chionoecetes opilio в Карском море с использованием БНПА “Видеомодуль” // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ–2021). 2021. С. 207–210.
2. *Гальцова В.В., Кулангиева Л.В., Погребов В.Б.* Мейобентос из районов бывшего ядерного полигона и мест захоронения радиоактивных отходов вокруг архипелага Новая Земля (Баренцево и Карское моря) // Биология моря. 2004. Т. 30. № 4. С. 263–271.
3. *Гарлицкая Л.А., Чертопруд Е.С., Портнова Д.А., Азовский А.И.* Бентосные Harpacticoida Карского моря: видовой состав и распределение на градиенте глубин // Океанология. 2019. Т. 59. № 4. С. 600–611.
4. *Карклин В.П., Юлин А.В., Шаратунова М.В., Мочнова Л.П.* Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4. С. 37–46.
5. *Лепихина П.П., Басин А.Б., Кондарь Д.В. и др.* Изменение количественных характеристик макро- и мейобентоса в заливе Благополучия с 2013 по 2020 г. (Новая Земля, Карское море) // Океанология. 2022. Т. 62. № 2. С. 235–244.
6. *Мокиевский В.О., Воробьева Л.В., Гарлицкая Л.А. и др.* Многолетние изменения в мейобентосе восточной части Черного моря // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С. 994–1001.
7. *Портнова Д.А., Гарлицкая Л.А., Удалов А.А., Кондарь Д.В.* Мейобентос и сообщество нематод Енисейского залива и прилегающего шельфа Карского моря // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 146–159.

8. *Руднева Е.В., Удалов А.А., Залота А.К., Чикина М.В.* Изменения донных сообществ центральной части Карского моря в результате вселения краба-стригуна *Chionoecetes opilio* // Морские исследования и образование (MARESEDU). 2022. С. 320–324.
9. *Соколов А.М.* Интродукция краба-стригуна опилио в Карское море: пример дальнейшей адаптивной стратегии этого вида в российском секторе Арктики (по результатам исследований ПИНРО в 2013 г.) // Рыбное хозяйство. 2014. № 6. С. 63–68.
10. *Удалов А.А., Анисимов И.М., Муравья В.О. и др.* Различия сообществ мегабентоса восточной и западной частей Карского моря по результатам видеонаблюдений // Океанология, в печати.
11. *Шереметевский А.М.* К вопросу о компенсации развития макробентоса мейобентосом на примере мидиевых банок Белого моря // Экология моря. 1991. Т. 39. С. 89–92.
12. *Alexeev D.K., Galtsova V.V.* Effect of radioactive pollution on the biodiversity of marine benthic ecosystems of the Russian Arctic shelf // Polar Science. 2012. V. 6. P. 183–195.
13. *Alves A.S., Adão H., Ferrero T.J. et al.* Benthic meiofauna as indicator of ecological changes in estuarine ecosystems: the use of nematodes in ecological quality assessment // Ecological Indicators. 2013. V. 24. P. 462–475.
14. *Azovsky A.I., Chertoprud E.S., Garlitska L.A.* Environmental stability and long-term variability of harpacticoid copepod assemblages // Marine Biology. 2022. Article 169:67. 12 p.
15. *Bianchi T.S., Arndt S., Austin W.E.N. et al.* Fjords as Aquatic Critical Zones (ACZs) // Earth-Science Reviews. 2020. V. 203. P. 103–145.
16. *Burgess R.* An improved protocol for separating meiofauna from sediments using colloidal silica sols // Marine Ecology Progress Series. 2001. V. 214. P. 161–165.
17. *Clarke K., Gorley R.J.P.-E.* Plymouth. PRIMER Version 7.0. 12: User Manual/Tutorial // PRIMER-E, 2015. 189 p.
18. *Coull B.C.* Are members of the meiofauna food for higher trophic levels? // Transactions of the American Microscopical Society. 1990. V. 109. P. 233–246.
19. *Galtsova V., Alexeev D.* Benthic communities of Russian Arctic Seas under radioactive pollution condition // Radioprotection. 2009. V. 44. No. 5. P. 713–718.
20. *Giere O.* Meiobenthology: the microscopic motile fauna of aquatic sediments. Springer Science & Business Media, 2008. 526 p.
21. *Grzelak K., Kotwicki L.* Meiofaunal distribution in Hornsund fjord, Spitsbergen // Polar Biology. 2012. V. 35. P. 269–280.
22. *Hicks G.* The ecology of marine meiobenthic harpacticoid copepods // Oceanogr. Mar. Biol. Anu. Rev. 1983. V. 21. P. 67–175.
23. *Kennedy A.D., Jacoby C.A.* Biological indicators of marine environmental health: meiofauna–a neglected benthic component? // Environmental Monitoring Assessment. 1999. V. 54. P. 47–68.
24. *Kotwicki L., Szymelfenig M., De Troch M., Zajaczkowski M.* Distribution of meiofauna in Kongsfjorden, Spitsbergen // Polar Biology. 2004. V. 27. № 11. P. 661–669.
25. *Legendre P., Anderson M.J.* Distance-based redundancy analysis: testing multispecies responses in multifactorial ecological experiments // Ecological monographs. 1999. V. 69. No. 1. P. 1–24.
26. Nemys. World Database of Nematodes. Accessed at https://nemys.ugent.be on 2023-08-18. doi:10.14284/366 //.
27. *Pawłowska J., Włodarska-Kowalczuk M., Zajączkowski M. et al.* Seasonal variability of meio- and macrobenthic standing stocks and diversity in an Arctic fjord (Adventfjorden, Spitsbergen) // Polar Biology. 2011. V. 34. № 6. P. 833–845.
28. *Pogrebov V., Fokin S., Galtsova V., Ivanov G.* Benthic communities as influenced by nuclear testing and radioactive waste disposal off Novaya Zemlya in the Russian Arctic // Marine pollution bulletin. 1997. V. 35. № 7–12. P. 333–339.
29. *Schratzberger M., Ingels J.* Meiofauna matters: the roles of meiofauna in benthic ecosystems // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2018. V. 502. P. 12–25.
30. *Schratzberger M., Warwick R.* Effects of physical disturbance on nematode communities in sand and mud: a microcosm experiment // Marine Biology. 1998. V. 130. P. 643–650.
31. *Soltwedel T., Grzelak K., Hasemann C.* Spatial and temporal variation in deep-sea meiofauna at the LTER Observatory HAUSGARTEN in the Fram Strait (Arctic Ocean) // Diversity. 2020. V. 12. No. 7. Art. 279. 23 p.
32. *Steyaert M., Moodley L., Nadong T. et al.* Responses of intertidal nematodes to short-term anoxic events // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2007. V. 345. № 2. P. 175–184.
33. *Wetzel M., Weber A., Giere O.* Re-colonization of anoxic/sulfidic sediments by marine nematodes after experimental removal of macroalgal cover // Marine Biology. 2002. V. 141. P. 679–689.
34. *Wieser V.W.* Die Beziehung zwischen Mundhöhlengestalt, Ernährungsweise und Vorkommen bei freilebenden marinen Nematoden: eine ökologisch-morphologische Studie // Arkiv för zoologi. 1953. Bd. 2. Folg. 4. S. 439–484.
35. *Włodarska-Kowalczuk M., Górska B., Deja K., Morata N.* Do benthic meiofaunal and macrofaunal communities respond to seasonality in pelagial processes in an Arctic fjord (Kongsfjorden, Spitsbergen)? // Polar Biology. 2016. V. 39. № 11. P. 2115–2129.
36. *Wlodarska-Kowalczuk M., Pearson T.H., Kendall M.A.* Benthic response to chronic natural physical distur-

bance by glacial sedimentation in an Arctic fjord // Marine Ecology Progress Series. 2005. V. 303. P. 31–41.

37. *Wojtasik B., Nowiński K., Staniszewska W., Kheireddine A.* Seasonal variability of meiobenthic assemblages inhabiting the Nottinghambukta tidal flat, SW Spitsbergen // Limnological Review. 2019. V. 19. № 4. P. 175–189.
38. WoRMS. World Register of Marine Species Available from https://www.marinespecies.org at VLIZ. Accessed 2023-11-08.doi:10.14284/170 //.
39. *Zalota A.K., Spiridonov V.A., Vedenin A.A.* Development of snow crab *Chionoecetes opilio* (Crustacea: Decapoda: Oregonidae) invasion in the Kara Sea // Polar Biology. 2018. V. 41. No. 10. P. 1983–1994.

DECADAL CHANGES IN TAXOCENES OF NEMATODA AND HARPACTICOIDA IN BLAGOPOLUCHIYA BAY (KARA SEA)

D. V. Kondar[a,*], P. V. Lepikhina[b], L. A. Garlitska[c], A. A. Udalov[a], M. V. Chikina[a], and V. O.Mokievsky[a]

[a] *P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117218 Russia*
[b] *Doumo, Coimbra, Portugal*
[c] *Scientific Center of Zoology and Hydroecology, National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Yerevan, 0014 Republic of Armenia*

The present paper describes the results of studies of two main components of meiobenthos – nematodes and harpacticoid copepods – conducted in 2013 and 2020 in Blagopoluchiya Bay (Novaya Zemlya, Kara Sea). A mosaic distribution of the two taxonomic groups was observed due to high species diversity and low occurrence of most species. Nevertheless, we identified patterns in the changes in the species structure of both groups related to the effect of two main environmental gradients (spatial gradient, related to the distance from the mouth of the bay to the sea, and depth-related gradient) as well as to the mosaic distribution of sediments. Changes among 2013 and 2020 were analyzed. In the seven years between the two surveys in Blagopoluchiya Bay, the abundance of nematodes increased tenfold, the copepod abundance also increased, but to a much lesser extent. Taxonomic changes in the two groups were observed at both species and family levels, with no differences in the functional structure of the taxa. The observed changes may be related both to changes in abiotic factors, and to general changes in the trophic system of the bay due to the introduction of the snow crab Chionoecetes opilio.

Keywords: meiobenthos, nematodes, harpacticoid copepods, Blagopoluchiya Bay, Novaya Zemlya, Kara Sea

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 597–604

МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ

УДК 551.465

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ВЛИЯНИИ ГЛУБИНЫ НА ТАКСОЦЕН НЕМАТОД В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ

© 2024 г. Д. А. Портнова, Л. А. Гарлицкая

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

** e-mail: daria.portnova@gmail.com*

Поступила в редакцию: 05.10.2023 г.
После доработки 14.12.2023 г.
Принята в печать 28.12.2023 г.

Структура таксоцена нематод Восточно-Сибирского моря исследовадась в рейсе ARA10C на НИС “Араон” в 2019 г. Материал был собран на разрезе от района внутреннего шельфа, от глубины 43 м, по склону до 1350 м. Таксономический состав сообщества нематод типичен для сибирских арктических морей в летне-осенний сезон. Установлено невысокое видовое разнообразия нематод по сравнению с другими морями российской Арктики. Были выделены роды, характерные для шельфа и для глубоководья. Плотность нематод в самом верхнем слое осадка увеличивается при движении с юга по шельфу, достигая максимальных значений на внешнем шельфе, уменьшаясь ниже по склону и достигая минимума в самой глубокой точке сбора. Выдвинуто предположение, что высокая численность и разнообразие нематод на внешнем шельфе обеспечивается высокими потоками органического вещества на границе водных масс, увеличивающими содержание кислорода и ила в осадке.

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, западный и восточный шельф, условия среды, нематоды, доминирующие виды, численность

DOI: 10.31857/S0030157424040048, **EDN:** PRWMMT

ВВЕДЕНИЕ

Восточно-Сибирское море является одним из самых труднодоступных морей Арктики, с самым широким шельфом в Северном Ледовитом океане, с площадью поверхности 9.9×10^5 км^2 и средней глубиной 58 м [10]. Мелководный шельф Восточно-Сибирского моря можно разделить на два региона – западный и восточный [34]. Западная часть находится под сильным влиянием притока пресной воды из крупных сибирских рек (Лены, Индигирки, Колымы), в то время как восточная часть находится под непосредственным влиянием водных масс тихоокеанского происхождения [16]. Восточно-Сибирское море является экологически важной зоной с разнообразными сообществами донной макрофауны и действует как переходная зона, где олиготрофные воды Атлантики смешиваются с эвтрофными водами Тихого океана [10].

В Восточно-Сибирском море первые количественные исследования с использованием дночерпателей были сделаны в крайней восточной его части с борта ледокола “Красин” в 1935 г. и “Садко” в 1937 г., после чего гидробиологические исследования на данной акватории не производились вплоть до 1973 г. Тогда съемкой были охвачены крайняя западная часть моря [3]. В дальнейшем, в 1986 и 1989 гг., были обследованы немногочисленные участки моря у Новосибирских островов и в Чаунской губе с помощью водолазного и дночерпательного методов [4]. Наконец, в 1995, 2003 и 2004 гг. были проведены обширные дночерпательные сборы в южной части Восточно-Сибирского моря с судов “Яков Смирницкий”, “Alpha Helix” и “Иван Киреев” [7]. Список видов донных беспозвоночных, известных из Восточно-Сибирского моря, на настоящий момент включает менее тысячи видов. Необходимо отметить, что большая часть акватории моря, за исключением региона двух крупных рек, Индигирка и Колыма, и прилегающего к ним шельфа, никогда не была обследована в целях изучения сообщества свободноживущих нематод.

Нематоды – одна из самых многочисленных и широко распространенных групп животных. Среди многоклеточных не найдется группы, освоившей более широкий диапазон сред обитания, чем нематоды. Представителей этой группы можно встретить на любой широте Земного шара в составе различных биоценозов, как водных, так и почвенных. Свободноживущие нематоды

встречаются повсеместно, и, как правило, для них характерна высокая численность. Среди российских арктических морей нематоды лучше всего изучены в Баренцевом и Белом морях. Это объясняется тем, что на побережье этих морей имеются биологические станции, что создает хорошие условия для сбора и обработки материала. Восточно-Сибирское море в силу своей отдаленности и суровости условий долгое время оставалось за пределами внимания исследователей. Лишь в последние годы положение существенно изменилось, участились комплексные экспедиции в самые отдаленные районы Арктики, в планы которых входит не только изучение макробентоса, но и сборы мейобентосных проб – основного источника материала по морским нематодам. Все это позволяет надеяться, что в недалеком будущем произойдет значительное расширение наших знаний относительно мейобентоса и сообщества нематод Арктики. В изучении нематофауны Восточно-Сибирского моря сделаны лишь первые шаги [29, 30]. Данное исследование представляет собой предварительный анализ распределения сообщества нематод западной и восточной части Восточно-Сибирского моря вдоль градиента глубин (40–1316 м). В этом материале мы (1) описываем закономерности распределения нематод на поверхности осадка в восточной части, (2) анализируем, как меняется состав сообщества нематод вдоль склона, используя известные и новые данные, (3) сравниваем разнообразие нематод с сообществами нематод из других арктических районов российской Арктики.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В ходе рейса ARA10C в Восточно-Сибирское море на НИС “Араон” с 30 августа по 20 сентября 2019 г. был собран материал на шельфе (40–65 м), склоне (120–600 м), в районе предполагаемых метановых высачиваний (1300 м). Рейс был посвящен изучению метановых высачиваний в двух регионах: склон Чукотского моря и шельф Восточно-Сибирского моря. Однако по результатам первичной обработки материала было установлено, что в месте сбора проб на террасе Кучерова (1350 м) в Восточно-Сибирском море не было выявлено геохимической активности, характерной для метановых высачиваний. Станции образуют разрез, идущий от глубины 40 м на шельфе, до глубины 1350 м (рис. 1, табл. 1).

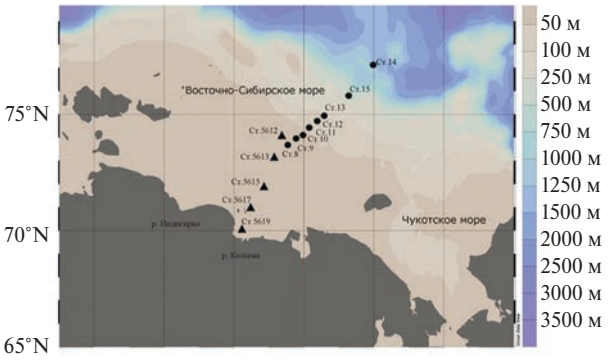

Рис. 1. Карта расположения станций, собранных в рейсе на НИС “Араон” (ARAON) в 2019 г. (черные кружки) и в рейсе AMK 69 в 2017 г. (черные треугольники).

Пробы грунта были собраны с помощью мультикорера. Мультикорер был оснащен набором из восьми поликарбонатных трубок для отбора осадка. Длина каждой трубки была 80 см, а диаметр – 10.5 см. После отбора осадка, мультикорер поднимали на борт судна, где происходила раздача трубок тем участникам рейса, которые занимались изучением морского осадка и придонной воды. Часть материала была обработана на борту судна, а часть передана в лаборатории Корейского института полярных исследований (KOPRI).

Таблица 1. Станции рейса ARA10C на судне “Араон” (ARAON), на которых были отобраны пробы

Номер станции	Широта	Долгота	Глубина (м)	Соленость (psu)	Температура придонного слоя воды (°C)
8	167° 40.6060′ E	73° 41.7522′ N	43	30	–1.4
9	168° 50.1753′ E	73° 56.2577′ N	48	31.8	–1.5
10	169° 49.1415′ E	74° 05.2578′ N	49	32	–1.5
11	170° 40.8649′ E	74° 24.5348′ N	59	33	–1.6
12	171° 50.0334′ E	74° 41.4787′ N	65	33	–1.4
13	172° 55.0516′ E	74° 56.4942′ N	123	34.3	–0.7
14	179° 58.8750′ E	77° 07.9210′ N	1351	34.9	–0.4
15	176° 19.9687′ E	75° 48.0242′ N	370	34.8	0.9

Пробы мейобентоса были собраны с помощью пластикового пробоотборника. Из трубки был собран набор проб: четыре пробы для изучения мейофауны, одна проба для анализа грануломет-рического состава и одна проба для определения органического углерода в осадке. Для изучения количественных характеристик мейобентоса и сообщества нематод колонка грунта из каждого пробоотборника выдавливалась и нарезалась на слои: 0–1, 1–2, 2–3, 3–4 и 4–5 см. Каждый слой фиксировался забуфференным на фильтрованной морской воде 4% формалином, и обрабатывался раздельно. Был обработан самый верхний слой (0–1 см) грунта на восьми станциях. Общий объем материала представлен 32 подпробами. В лаборатории все мейобентосные пробы были окрашены красителем “Бенгальская роза”. После этого осадок промывался через сито с ячеей 40 мкм [22]. Весь многоклеточный мейобентос был посчитан и классифицирован по таксонам. Отобранные экземпляры нематод переводили по стандартной методике через жидкость Зайнхорста (70 частей дистиллированной воды, 29 частей 95% этанола и 1 часть глицерина) в глицерин и монтировали на предметных стеклах для микроскопирования. Определение нематод проводилось с помощью микроскопов Olympus BX-51. В результате было посмотрено 1700 нематод. Нематоды были определены до уровня рода.

Дополнительно в работе мы использовали данные, полученные после обработки материала, собранного в Восточно-Сибирском море в сентябре 2017 г. с борта научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” во время рейса АМК 69 с использованием пробоотборника Неймисте. Пробы были собраны вдоль широтного разреза по 160° восточной долготы на глубинах от 17 до 50 м от дельты реки Колыма до прилегающих участков шельфа Восточно-Сибирского моря. Длина разреза 550 км. Самые мелкие станции были расположены вблизи дельты реки, в то время как самая глубокая находилась на шельфе (см. рис. 1). Абиотические характеристики были опубликованы ранее [5, 8]. Для статистической обработки использовались стандартные процедуры анализа родового состава и структуры сообществ. В качестве меры обилия использовался процент вида от общего количества нематод в пробе. Статистическая обработка материалов проводилась с помощью программы PAST [19].

Закономерности распространения нематод на видовом уровне в крупном масштабе изучены плохо. Сравнение затруднено тем, что исследования либо проводятся на уровне родов нематод, либо основаны на разделении на морфотипы. До недавнего времени считалось, что нематоды – это космополиты, однако с появлением молекулярных методов оказалось, что один морфологический вид на самом деле может представлять собой комплекс из нескольких филогенетически различных видов, каждый из которых имеет ограниченное распространение [15]. Также есть данные о видах с распределением во всех зонах океана [26] и с распределением по разным глубинам или биотопам [15, 23]. В нашей работе мы используем определение нематод на уровне родов, чтобы было удобно сравнивать с большим количеством литературных источников.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Нематоды являются доминирующей группой среди многоклеточного мейобентоса на всем разрезе. На станциях доля нематод меняется от 23 до 85%. На разрезе плотность поселения нематод в самом верхнем слое осадка увеличивалась от станции 8 (80 экз/10 см^2) вдоль шельфа до глубин 59–65 м (1877 экз/10 см^2), в месте перехода шельфа в склон численность уменьшалась, достигнув минимальных значений на самой глубокой станции 15 (36 экз/10 см^2) (рис. 2).

На восьми станциях было идентифицировано в общей сложности 1700 особей нематод, представляющих 41 род и принадлежащих к 28 семействам. Количество родов на станции колебалось от 15 до 32. Наиболее важными семействами нематод с точки зрения общей плотности были Comesomatidae, Desmodoridae и Xyalidae, на долю которых приходилось 14–24%, а на Chromadoridae, Monhysteridae и Linhomoidae приходилось 5–11% от общей фауны нематод. Семейства Xyalidae (5 родов) и Chromadoridae (5 родов) содержали наибольшее количество родов, за которыми следовали Diplopeltidae (3 рода). Индексы разнообразия не выявили сильных различий в составе родов между станциями разрезами (табл. 2).

Однако станция 11 обладает высоким индексом доминирования, и станция 14, наоборот, самым низким. На станции 11 отмечена высокая численность нематод из рода *Molgolaimus*. Станция 14 отличается низкой численностью нематод и присутствием по несколько особей каждого рода, вследствие этого низкий индекс доминирования (см. табл. 2).

Наиболее отличающимися по составу нематод были станции 10 и 11. На станции 10 было отмечено доминирование двух родов: *Molgolaimus* и *Elzalia*, на станции же 11 численность *Molgolaimus* еще больше увеличивается, а *Elzalia* снижается,

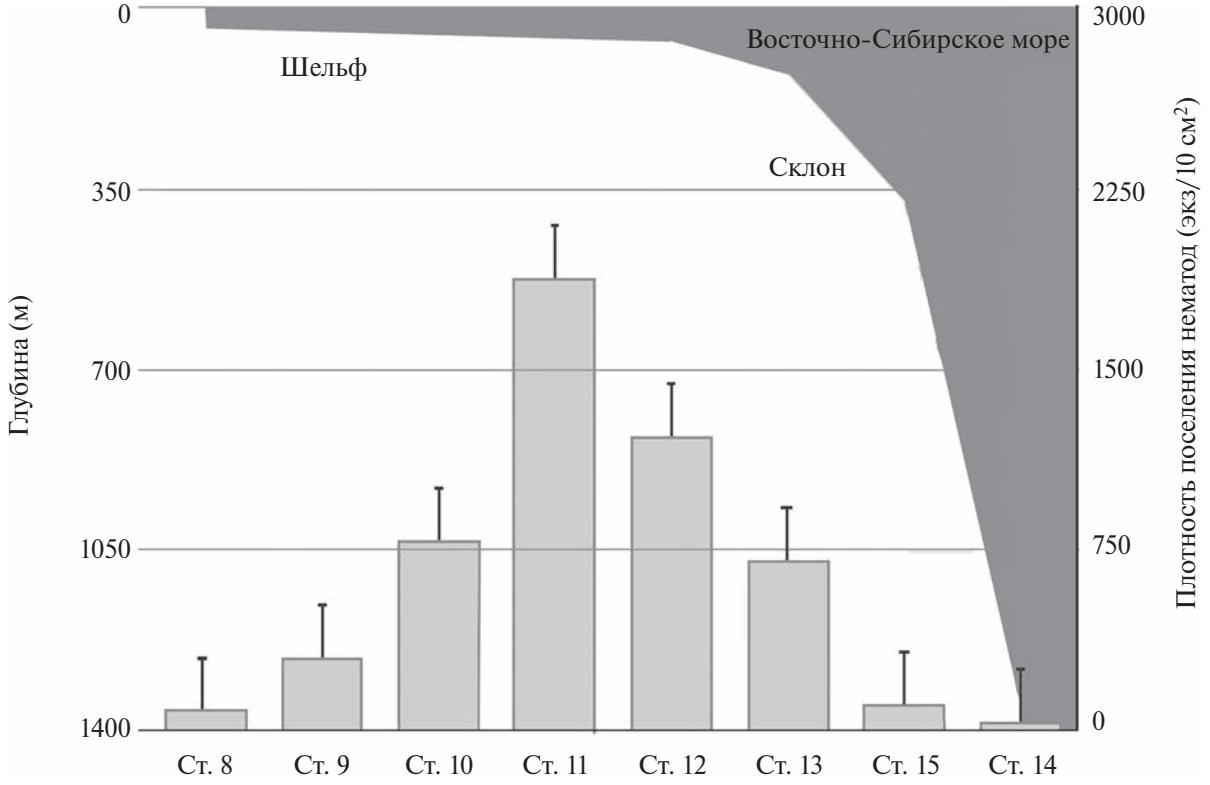

Рис. 2. Плотность поселения нематод на трансекте. Приведены средние значения и стандартное отклонение обилия нематод. Ось абсцисс – номера станций. Оси ординат – глубина (м) и плотность поселения (экз/10 см^2).

Таблица 2. Характеристики родового разнообразия таксоцена нематод на исследованных станциях

Показатель	Ст. 8	Ст. 9	Ст. 10	Ст. 11	Ст. 12	Ст. 13	Ст. 14	Ст. 15
Число особей в слое 0–1 см/10 см^2	80	312	791	1877	1225	714	36	116
Число родов	16	18	21	20	22	17	7	12
Индекс доминирования	0.176	0.261	0.165	0.343	0.122	0.181	0.076	0.164
Индекс Симпсона	0.824	0.739	0.835	0.657	0.877	0.819	0.924	0.836
Пиелу *J*	0.745	0.666	0.697	0.558	0.777	0.739	0.980	0.825

но при этом этот род остается вторым по плотности поселения. Анализ последовательностей (seriation) показал, что на всех станциях разреза встречаются роды *Molgolaimus, Endeolophos* и *Daptonema*. Их численность ответственна за различия между станциями, расположенными на шельфе и склоне. Можно выделить роды, присутствующие только на шельфе: *Leptolaimus, Halalaimus, Elzalia, Aponema*, а также роды, которые появляются на глубине ниже 300 м: *Abelbolla, Cyatholaimus, Tricoma, Parapinnanema.*

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моря Евразийского шельфа, включая Баренцево море, Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море и Чукотское море, занимают почти 70% поверхности Северного Ледовитого океана [36]. На гидрологический режим этих морей влияет речной сток и длительный морской ледяной покров с полыньями. Взвешенные вещества речного происхождения играют важную роль в формировании морских отложений. Речной сток является источником органического углерода, содержащегося в осадке [11, 33]. Существуют основные структурообразующие факторы: соленость, физико-химические свойства донных отложений, доступность пищи. Они играют наиболее важную роль в характере распределения сообщества нематод [24]. Относительная значимость факторов может значительно различаться и зависит от биотопов и регионов [6]. В ранних

исследованиях мейофауны Восточно-Сибирского моря отмечалось, что низкая численность организмов вблизи берега была вызвана малыми глубинами, опреснением, высокой мутностью и абразивным воздействием льда [2, 4, 9]. В зоне активного перемешивания с малыми глубинами, опреснением и повышением температуры воды сообщество нематод чувствует себя некомфортно, разнообразие на уровне родов невысокое. Согласно данным из Карского моря, с увеличением расстояния от береговой линии содержание органического вещества уменьшалось, осадок становился илистым и обогащенным кислородом, что положительно влияло на численность и разнообразие мейофауны и таксофона нематод [32]. Влияние глубины на сообщества нематод часто изучается в сочетании с продуктивностью, поскольку поступление пищи уменьшается на больших глубинах. В отличие от пика разнообразия на батиальных глубинах [12], численность нематод уменьшается с увеличением глубины [6]. Этот тренд можно ожидать вдоль любого склона, но исключения возникают, когда вдоль батиметрического разреза происходят изменения в продуктивности или изменяется рельеф дна. Каньоны, впадины, маргинальные зоны льда, зоны с минимальным содержанием кислорода являются примерами местообитаний, где наблюдается такое воздействие. Геологические разломы, каньоны, могут быть как бедными видами, так и богатыми по сравнению с соседними склонами на той же глубине из-за накопления пищевых ресурсов и связанных с ними биогеохимических изменений или воздействия гидродинамических факторов [14]. В маргинальных ледовых зонах численность и родовое богатство под покровом льда значительно ниже, чем в незамерзающих акваториях [17, 18].

Мы пришли к выводу, что таксоцен нематод изученного разреза близок к родовому составу нематод из Карского моря и моря Лаптевых [31, 37]. В море Лаптевых таксоцен нематод вдоль градиента глубины был разделен на сообщества шельфа и склона. Авторы представили список родов и относительную значимость (%) двадцати наиболее распространенных родов нематод со станций, отобранных на глубинах 65–3237 м [38]. Таксономическая структура сообществ нематод в мелководной части моря Лаптевых была близка к таксоцену нематод, изученному на прилегающем к дельте реки Лены шельфе моря Лаптевых [31]. Оба исследования показали высокую плотность поселения на мелководном шельфе двух родов, *Daptonema* и *Halalaimus*, также были выявлены роды, которые являются общими для этих акваторий (*Sabatieria, Microlaimus, Halalaimus, Daptonema)*. В море Лаптевых на глубоководных станциях склона доминировали нематоды родов *Monhystera* и *Leptolaimus* [38].

В нашем исследовании род *Leptolaimus* отмечен только на шельфе. Плотность поселения и разнообразие нематод вдоль батиметрического разреза в Восточно-Сибирском море увеличивались по направлению с юга на север. Такие же результаты были получены при изучении шельфа и склона желоба Воронина [32]. От шельфовых станций к склону желоба Воронина плотность поселения и разнообразие увеличивалось, и снова снижалась на самой глубокой станции разреза (неопубликованные данные). В море Лаптевых численность нематод и разнообразие на родовом уровне также уменьшалось с глубиной [38]. Разделение между мелководными и глубоководными станциями, обнаруженное в нашем исследовании, а также в море Лаптевых, соответствует общей тенденции, наблюдаемой в других областях океана: район Гобан-Спур [39], в Средиземном море [35], в северо-западной Атлантике [35]. Внутри выделенных групп существует различия в доминирующих родах нематод.

Наиболее разнообразными по родовому составу были семейства Xyalidae и Chromadoridae, по 5 родов. Такие же данные были получены по прилегающему шельфу Восточно-Сибирского моря по материалу, отобранному на НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2017 г [30]. Результаты сравнения разнообразия таксоцена нематод на шельфе в западной части Восточно-Сибирского моря [30] с нашим разрезом показывают, что родовое богатство выше в первом случае. На разрезах от Индигирки и Колымы до прилегающего шельфа было отмечено по 56 родов и родовое разнообразие колебалось от 15 до 32 родов на станцию. В данном исследовании общее количество родов 41 и разнообразие на станциях составило от 7 до 22 родов. Данная работа сделана по самому верхнему слою, 0–1 см осадка, и можно ожидать, что последующее определение нематод из более глубоких слоев осадка покажет большее их разнообразие. Интересная особенность была отмечена при анализе доминирующих родов. Многочисленный на шельфе род *Sabatieria* исчезает с увеличением глубины и продвижением на северо-восток по разрезу. Род *Sabatieria* часто является одним из самых многочисленных от шельфа до середины материкового склона и в каньонах [27]. Более высокая численность этого рода на мелководном склоне была описана для северо-западной части Атлантического океана, Средиземного

и Черного морей [25, 35]. Этот род демонстрирует высокую толерантность к гипоксическим условиям [13]. В морях Российской Арктики это один из самых многочисленных на мелководном шельфе в Карском море и море Лаптевых [31, 37].

Теплые и соленые воды Атлантики играют особую роль в тепловом балансе Северного Ледовитого океана и поступают в Северный Ледовитый океан двумя крупными потоками через пролив Фрама и шельф Баренцева моря, объединяясь только на севере Карского моря [16]. Далее эти водные массы переносятся вдоль шельфа с запада на восток (трансполярный дрейф) примерно на глубинах 150–300 м вдоль внешнего склона через Восточно-Сибирское море в направлении хребта Менделеева [41]. Изучение макробентоса и мейофауны в Карском море показало, что промежуточные водные массы Атлантики, отличаясь положительной температурой и океанической соленостью, несут большое количество органического вещества и играют важную роль в формировании бентоса на глубинах 200–300 м [1, 32]. В западной части Восточно-Сибирского моря шельфовые водные массы разделяются на опресненные, которые преобладают на глубинах 15–65 м, и соленые, залегающие на глубинах 40–100 м. Высокая плотность поселения нематод была зафиксирована на глубинах 59–65 м, в месте перехода шельфа в склон в западной части Восточно-Сибирского моря. В Восточно-Сибирском море в районе 170° в. д. происходила смена доминирующих родов нематод: на первое место по обилию вместо *Sabatieria* выходит род *Molgolaimus.* Эти станции находятся под влиянием холодных, эугалинных (32–34 psu) арктических вод. Перемешивание воды не наблюдалось, исключение составила станция 8. На этой станции на первых 15 м была теплая и опресненная вода (+1.2°C, 26 psu), которая в слое ниже 15 м сменялась холодной более соленой водой (–1.5°C, 30 psu). В месте перехода шельфа в склон численность *Molgolaimus* уменьшалась и ниже по склону в сообществах нематод отсутствовал доминант. В море Лаптевых род *Molgolaimus* входит в десять самых многочисленных родов. Его численность повышалась по мере удаления от береговой зоны через шельф к склону [31]. Высокая численность рода *Sabatieria* на шельфе, ближе к эстуариям рек, может быть связана с высоким потоком органического вещества и заилением грунта. Это условия, в которых род *Sabatieria* чувствует себя комфортно, тогда как другие нематоды избегают условий низкого содержания кислорода и высокого содержания органики. При продвижении на север речной сток оказывает все меньшее влияние и сообщество нематод меняется, на первое место выходят другие роды нематод. Разумно предположить, что высокая численность и разнообразие нематод на станциях 11 и 12 обеспечивается высокими потоками органического вещества на границе водных масс, увеличивающими содержание кислорода и ила в осадке. Подобная закономерность была отмечена в Карском море при изучении таксоцена нематод в Енисейском заливе и прилегающем шельфе [37]. В Восточно-Сибирском море роды *Abelbolla u Cyatholaimus* регистрируются на глубине ниже 300 м. В Карском море эти же роды нематод обнаружены на самых северных и глубоких станциях [37]. Отметим, что род *Abelbolla* был открыт в 2004 г. на глубинах около 70–80 м. Род включает пять видов, зарегистрированных в Желтом море и в Корейском проливе [20]. В связи с этим будет проведено дальнейшее определение нематод *Abelbolla* из Восточно-Сибирского и Карского морей до вида. Можно предположить, что это будет либо новый вид, либо первая регистрация этого рода за пределами Желтого моря.

По нашим результатам плотность поселения нематод в самом верхнем сантиметре снижается при увеличении глубины начиная с глубины 120 м, и ответить на вопрос, по каким причинам это происходит, можно будет, установив вертикальное распределение нематод в колонках осадка на все 5 см. На численность и состав арктического бентоса в значительной степени влияют мезомасштабные пелагические процессы, тем самым подчеркивая взаимосвязь пелагиали и бентоса в высокоширотных морях [28]. Ранее была показана косвенная взаимосвязь между гидродинамикой, концентрациями взвешенного вещества, процессами седиментации и трофической структурой бентоса в Карском море [21, 40]. Наше предварительное исследование разреза в Восточно-Сибирском море демонстрирует результат комплексного влияния всех факторов, действующих совместно.

Полученный материал предварительно позволяет говорить о невысоком разнообразии сообщества нематод Восточно-Сибирского моря в исследованный безледный сезон по сравнению с другими эпиконтинентальными морями Сибирской Арктики. Также можно говорить о разделении таксоцена нематод на сообщество мелководного шельфа и глубоководных арктических районов. И безусловно, можно говорить о влиянии разных водных масс на сообщество нематод в Восточно-Сибирском море. На сегод-

няшний день нельзя говорить о существенных различиях в структуре таксоцена нематод западной и восточной областей бассейна. Дальнейшее изучение этого материала даст нам основания для подтверждения существенной зональной гетерогенности Восточно-Сибирского моря.

Благодарности. Авторы благодарны руководителю лаборатории опасных геологических процессов к. г.-м. н. Борису Викторовичу Баранову без которого не было бы участия в рейсе биологического отряда на судне “Араон”, и не было бы сбора материала. Авторы выражают благодарность рецензенту за ценные замечания и предложения по улучшению рукописи.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках темы проекта РНФ № 23-27-00304 (обработка и анализ материала).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимова Н.В., Фродова Е.А., Любин П.А. и др.* Видовой состав и количественное распределение макробентоса в районе желоба Воронина и на прилегающей части континентального склона // Фауна беспозвоночных Карского, Баренцева и Белого морей. Мурманск: ММБИ, 2003. С. 79–92.
2. *Гальцова В.В., Лукина Т.Г., Владимиров М.В.* Мейобентос Чаунской Губы, Восточно-Сибирское море // Исследования фауны морей. 1994. Т. 48 (56). С. 67–97.
3. *Голиков А.Н., Скарлато О.А., Аверинцев В.Г и др.* Экосистемы Новосибирского мелководья и некоторые закономерности их распределения и функционирования // Исследования фауны морей. 1990. Т. 37 (45). С. 4–79.
4. *Голиков А.Н., Гагаев С.Ю., Гальцова В.В. и др.* Экосистемы, флора и фауна Чаунской губы Восточно-Сибирского моря // Исследования фауны морей. 1994. Т. 47 (55). С. 4–111.
5. *Демидов А.Б., Гагарин В.И.* Первичная продукция и условия ее формирования в Восточно-Сибирском море в осенний период // Докл. РАН. 2019. Т. 487. № 6. С. 696–700.
6. *Мокиевский В.О., Удалов А.А., Азовский А.И.* О количественном распределении мейобентоса глубоководных зон Мирового океана // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 857–874.
7. *Сиренко Б.И., Денисекно С.Г.* Фауна беспозвоночных Восточно-Сибирского моря, закономерности распределения и структура донных сообществ // Исследования фауны морей. 2010. Т. 66 (74). С. 160–177.
8. *Суханова, И.Н., Флинт М.В., Федоров А.В. и др.* Первые данные о структуре фитопланктонах сообщества Восточно-Сибирского моря // Океанология. 2021. Т. 61. № 6. С. 936–957.
9. *Шереметьевский А.М.* Роль мейобентоса в биоценозах шельфа // Исследования фауны морей. 1987. Т. 35 (43). С. 3–136.
10. *Anderson L.G., Björk G., Jutterström S. et al.* East Siberian Sea, an Arctic region of very high biogeochemical activity // Biogeosciences. 2011. V. 8. Iss. 6. P. 4–6.
11. *Barber D.G., Massom R.A.* The role of sea ice in Arctic and Antarctic polynyas // Oceanography Series. 2007. V. 74. P. 1–54.
12. *Boucher G., Lambshead P.J.D.* Ecological biodiversity of marine nematodes in samples from temperate, tropical and deep-sea regions // Conservation Biology. 1995. V. 9. P. 1594–1604.
13. *Broman E., Bonaglia S., Holovachov O. et al.* Uncovering diversity and metabolic spectrum of animals in dead zone sediments // Communications biology. 2020. V. 3 (1). P. 106.
14. *Danovaro R., Bianchelli S., Gambi C. et al.* α-, β-, γ-, δ- and ε-diversity of deep-sea nematodes in canyons and open slopes of Northeast Atlantic and Mediterranean margins // Marine Ecology Progress Series. 2009. V. 396. P. 197–209.
15. *Derycke S., Remerie T., Backeljau T. et al.* Phylogeography of the *Rhabditis (Pellioditis) marina* species complex: evidence for long-distance dispersal, and for range expansions and restricted gene flow in the northeast Atlantic // Molecular Ecology. 2008. V. 17. P. 3306–3322.
16. *Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay L.B. et al.* Impact of the Arctic Ocean Atlantic water layer on Siberian shelf hydrography // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2010. V. 115. № C8.
17. *Fonseca G., Soltwedel T.* Deep-sea meiobenthic communities underneath the marginal ice zone off Eastern Greenland // Polar Biology. 2007. V. 30. P. 607–618.
18. *Fonseca G., Soltwedel T.* Regional patterns of nematode assemblages in the Arctic deep seas // Polar Biology. 2009. V. 32. P. 1345–1357.
19. *Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D.* PAST paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontology Electron. 2001. V. 4. P. 1–9.
20. *Huang Y., Zhang Z.* A new genus and three new species of free-living marine nematodes (Nematoda: Enoplida: Enchelidiidae) from the Yellow Sea, China. CBM–Cahiers de Biologie Marine. 2004. V. 45. P. 343–354.
21. *Jørgensen L.L., Pearson T.H., Anisimova N.A. et al.* Environmental influences on benthic fauna associations of the Kara Sea (Arctic Russia) // Polar Biology. 1999. V. 22 (6). P. 395–416.
22. *Holme N.A., McIntyre A.D.* Methods for the study of marine benthos. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1984. 387 p.
23. *Miljutin D.M., Gad G., Miljutina M.A. et al.* The state of knowledge on deep-sea nematode taxonomy: how many valid species are known down there? // Marine Biodiversity. 2010. V. 40. P. 143–159.

24. *Moens T., Braeckman U., Derycke S. et al.* Ecology of free-living marine nematodes // Nematoda. 2013. V. 2. P. 109–152.
25. *Mureşan M.* Assessment of free-living marine nematodes community from the NW Romanian Black Sea shelf // Geo Ecology Marine. 2012. V. 18. P. 133–145.
26. *Muthumbi A.W., Vincx M. Acantholaimus* (Chromadoridae: Nematoda) from the Indian Ocean: description of seven species // Hydrobiologia. 1997. V. 346. P. 59–76.
27. *Netto S.A., Attrill M.J., Warwick R.M.* Sublittoral meiofauna and macro-fauna of Rocas Atoll (NE Brazil): indirect evidence of a topographically controlled front // Marine Ecology Progress Series. 1999. V. 179. P. 175–186.
28. *Piepenburg D., Schmid M.* A photographic survey of the epibenthic megafauna of the Arctic Laptev Sea shelf: distribution, abundance, and estimates of biomass and organic carbon demand // Marine Ecology Progress Series. 1997. V. 147. P. 63–75.
29. *Platonova T.A., Kulangieva L.V.* Marine Enoplida from the East Siberian Sea (Nematoda) // Zoosystematica Rossica, 1995. V. 3 (2). P. 175–180.
30. *Portnova D.A., Garlitska L.A., Polukhin A.A.* The effect of estuarine system on the meiofauna and nematodes in the East Siberian Sea // Scientific Reports. 2021. V. 11 (1). P. 19306.
31. *Portnova D., Fedyaeva M.A., Udalov A.A., Tchesunov A.V.* Community structure of nematodes in the Laptev Sea shelf with notes on the lives of ice nematodes // Regional Studies in Marine Science. 2019. V. 31. P. 100757.
32. *Portnova D., Polukhin A.* Meiobenthos of the eastern shelf of the Kara Sea compared with the meiobenthos of other parts of the sea // Regional Studies in Marine Science. 2018. V. 24. P. 370–378.
33. *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. 2018. V. 35 (5). P. 411–423.
34. *Semiletov I., Dudarev O., Luchin V. et al.* The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32 (10).
35. *Soetaert K., Heip C.* Nematode assemblages of deep sea and shelf break sites in the North Atlantic and Mediterranean Sea // Marine Ecology Progress Series. 1995. V. 125. P. 171–183.
36. *Stein R., Macdonald R.W.* Organic carbon budget: Arctic Ocean vs. global ocean // The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. 2004. P. 315–322.
37. *Udalov A., Chikina M., Azovsky A. et al.* Integrity of benthic assemblages along the arctic estuarine-coastal system // Ecological Indicators. 2021. V. 121. P. 107115.
38. *Vanaverbeke J., Arbizu P.M., Dahms H.U., Schmink H.K.* The metazoan meiobenthos along a depth gradient in the Arctic Laptev Sea with special attention to nematode communities // Polar Biology. 1997. V. 18 (6). P. 391–401.
39. *Vanaverbeke J., Merckx B., Degraer S., Vincx M.* Sediment-related distribution patterns of nematodes and macrofauna: two sides of the benthic coin? // Marine Environmental Research. 2011. V. 71 (1). P. 31–40.
40. *Vedenin A.A., Galkin S.V., Kozlovsky V.V.* Macrobenthos of the Ob Bay and adjacent Kara Sea shelf // Polar Biology. 2015. V. 38. P. 829–844.
41. *Wang X., Zhao J., Lobanov V.B. et al.* Distribution and transport of water masses in the East Siberian Sea and their impacts on the Arctic halocline // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2021. V. 126 (8). P. e2020JC016523.

PRELIMINARY DATA ON THE EFFECT OF DEPTH ON THE NEMATODE COMMUNITY IN THE EAST SIBERIAN SEA

D. Portnova*, L. Garlitska

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

** e-mail: daria.portnova@gmail.com*

The nematode community was studied at the 8 stations in the eastern part of East Siberian Sea shelf (43 m) and at the slope and at the deep sea site (1350 m). All samples (depth range 43–1350 m) were collected at the north-eastern part of the East Siberian Sea during the ARA10C cruise of RV Araon in 2019 using MUC corer. Taxonomic composition of the nematode community has shown that it was typical for the Siberian Arctic Seas. The poverty of the nematode diversity of the East Siberian Sea in comparison with other seas of the Russian Arctic has been established. Nematode genera typical for the shelf and for deep sea were identified. The density of nematodes in the uppermost sediment layer increased from the southernmost station along the shelf, reaching maximum on the outer shelf, and decreasing downhill, where the minimum abundance was at the deepest site. It was suggests that the high abundance and diversity on the outer slope was provided by high organic matter flows at the boundary of water masses, increasing the oxygen and silt content in the sediment.

Keywords: East Siberian Sea, western and eastern shelf, environmental conditions, nematodes, dominant species, abundance

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 605–615

МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ

УДК 639.4

МЕЙОБЕНТОС ОСТРОВОВ КОНДАО (ВЬЕТНАМ): РАЗЛИЧИЯ В СТРУКТУРЕ ТАКСОЦЕНОВ РИФ-ФЛЕТА И МАНГРОВЫХ ЗАРОСЛЕЙ

© 2024 г. В. О. Мокиевский[1, *], А. В. Чесунов[2], Д. В. Кондарь[1], Л. А. Гарлицкая[1], Нгуен Динь Ты[3], Нгуен Тхи Зуан Фыонг[3]

[1] Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

[2] Биологический факультет Московского государственного университета, Москва, Россия

[3] Институт экологии и биологических ресурсов ВАНТ, Ханой, Вьетнам

** e-mail: vadim@ocean.ru*

Поступила в редакцию 06.09.2023 г.
После доработки 26.09.2023 г.
Принята к публикации 16.11.2023 г.

Проанализированы пробы мейобентоса, собранные на архипелаге Кондао (Вьетнам) в двух биотопах: в мангровых зарослях и на прилегающих к ним участках риф-флета. Приведены количественные характеристики основных групп мейобнтоса и проанализирован таксономический состав ведущих таксонов – нематод и гарпактикоидных копепод. Показано, что анализ видового состава неинформативен при высоком видовом разнообразии и большом числе уникальных видов в каждой пробе. Более информативно использование обобщенных характеристик сообществ – спектров семейств, экологических или морфологических групп видов. На уровне семейств и подсемейств для нематод выявляются отчетливые различия в населении песчаного дна и мангровых зарослей. Для гарпактикоидных копепод информативно соотношение жизненных форм в разных биотопах. Показаны большие различия в таксономическом составе исследованных бухт, межбиотопические различия дают меньший вклад в общее разнообразие, т. е. каждая бухта обладает своим набором видов, из которого формируется население каждого из биотопов. Нематоды и гарпактициды распределены в пространстве независимо друг от друга.

Ключевые слова: мейобентос, нематоды, гарпактикоиды, мангры, Вьетнам

DOI: 10.31857/S0030157424040053, **EDN:** PRROIU

ВВЕДЕНИЕ

Роль мангров как эдификаторов, структурирующих сообщества всех размерных групп бентоса, достаточно очевидна и подтверждена исследованиями на разных группах организмов [1]. Для организмов мейобентоса показаны различия в структуре населения под кронами разных видов мангров [3, 15]. В частности, установлено, что структура таксоценов нематод зависит от типа корневой системы мангровых деревьев: опорные корни видов рода *Rhizophora* сильнее модифицируют и структуру грунта, и состав населяющих его сообществ, чем расположенная глубже под поверхностью корневая система видов *Avicennia*.

Мейобентос мангровых лесов служит объектом интенсивных исследований, но их ограничивают серьезные затруднения, связанные с большим разнообразием и слабой изученностью видового состава ведущих групп мейобентоса – нематод и гарпактикоидных копепод. Мангры Вьетнама изучены достаточно подробно в отношении нематофауны; каталог нематод мангров Вьетнама еще несколько лет назад содержал 208 видов свободноживущих нематод [14], но каждое новое исследование приносит новые для науки виды. Сейчас число видов нематод, известных из прибрежной зоны Вьетнама, превышает 300 [16].

Привлекательность мейобентоса и его отдельных групп, в том числе, как удобного инструмента экологического мониторинга [21], заставляет искать способы преодоления трудностей, связанных с таксономическими проблемами: большим числом новых или трудно определяемых видов. В качестве возможных подходов можно рассматривать таксономическую генерализацию, т. е. повышение ранга анализируемых таксонов. Объектом исследования в этом случае становятся спектры родов, семейств или высших таксонов.

Другой подход предполагает использовать экологические классификации вместо таксономических, в качестве переменных выступают жизненные формы организмов или, как это принято в последние годы – наборы экологически значимых характеристик видов [8, 22]. Этот подход интенсивно развивается под названием “анализ экологических признаков” (biological traits analysis или BTA – [9] и многие другие).

Материал, собранный в 2010 г. на архипелаге Кондао (Côn Đảo) в наиболее сохранившихся прибрежных биотопах Вьетнама, позволяет решить две задачи: во-первых, вывить различия в составе и структуре мейобентосного населения разных биотопов и бухт о-вов Кондао и, во-вторых, определить, на каких уровнях генерализации данных эти различия проявляются наиболее отчетливо.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал был собран в марте 2010 г. на трех островах архипелага Кондао на пяти станциях, расположенных на трех островах архипелага: три – на острове Коншон (в бухте Дамче – станции 2 и 3) и в бухте Куату (станция 5) и по одной на островах Хонбайкань (бухта Бодап, ст. 1) и Хонба (бухта Дамкуок, ст. 4). Расстояние между самыми дальними станциями (2 и 4) – 15 км по прямой (рис. 1).

Все станции расположены в сходных условиях – в полузакрытых бухтах, имеющих округлые очертания и врезанных в берег на глубину от полукилометра до километра и более (рис. 2). Внутренняя часть бухт заполнена риф-флетом, в большей или меньшей степени отмершим и погребенным под слоем песка. Наибольшая мощность осадков на риф-флете выявлена в бухте Куату (ст. 5) на южной оконечности о. Коншон, где риф-флет полностью погребен под намытыми осадками, наименьшая – в бухтах Бодап (о. Хонбайкань, ст. 1) и в бухте Дамче на севере о-ва Коншон (ст. 2 и 3). Здесь внешняя часть риф-флета в большой мере населена живыми кораллами и зарослями саргассов.

Внешней границей литорали со стороны моря служит обычно достаточно резко выраженный рифовый склон, круто уходящий в море от отметки 0.5–0.7 (1.0) м выше уровня моря до глубины 7–15 м и более. Внешняя часть риф-флета расположена на отметках 1.2–1.4 м выше уровня моря. Коралловые постройки перемежаются здесь с густыми зарослями водорослей рода *Sargassum*. Внешняя часть риф-флета может плавно переходить во внутреннюю, но, чаще, отделена повышением дна, отделяющем внутреннюю лагуну от внешней части риф-флета. Дно внутренней лагуны расположено на отметках около 1.1–1.2 м над уровнем моря, оно выложено плитами коралловых построек и замыто песком, слой которого может составлять от нескольких сантиметров до метра и более. Для внутренней лагуны характерны водоросли рода *Padina*, редкие *Sargassum* spp. и *Turbinaria* spp., иногда – *Codium* spp. и луговины морских трав (преимущественно, *Enhalus acaroides*). На уровне 1.7–1.9 м над уровнем моря лагуну окружает зона хорошо сортированного песка с поселениями бычков и альфеидных креветок, с участием манящих крабов (*Uca* spp.), которые могут образовывать локальные плотные поселения.

Рис. 1. Схема островов Кондао и расположение станций, на которых отбирались пробы в 2010 г.

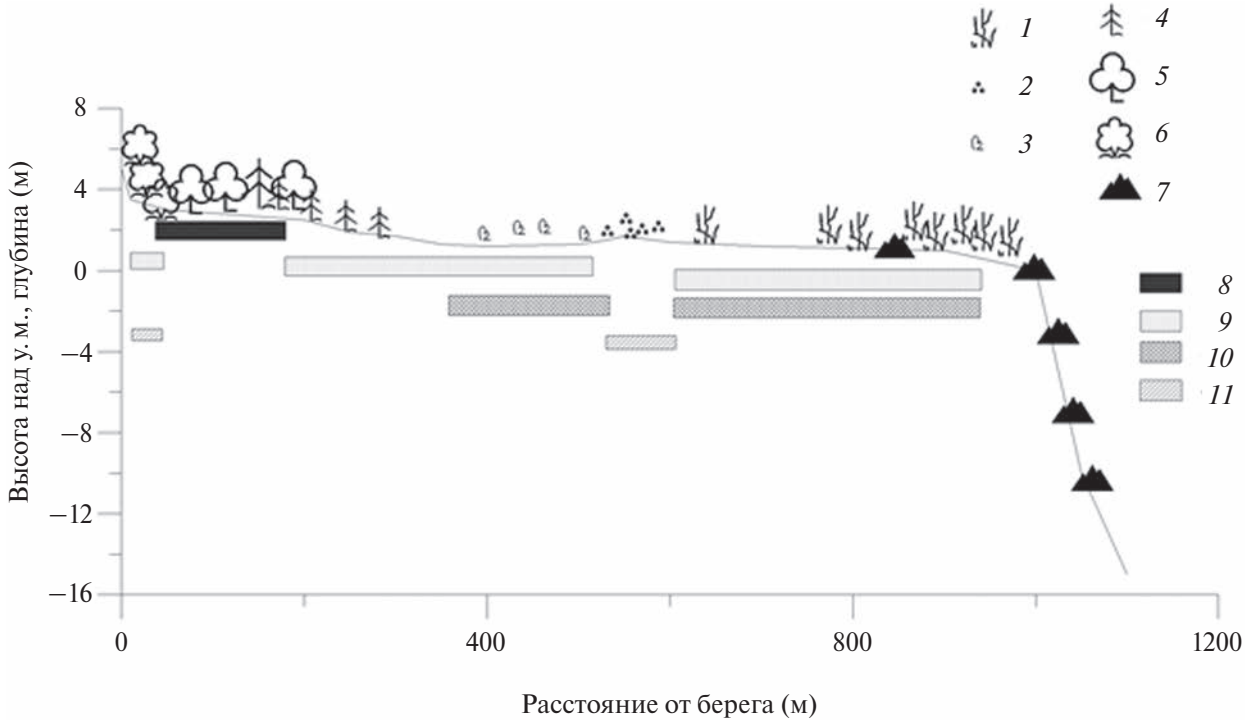

Рис. 2. Обобщенный профиль литорали (разрез по оси бухты). Фации литорали: заросли *1* – *Sargassum* spp.; *2* – каменистые косы; *3* – лагуна с *Padina* sp.; *4* – *Rhizophora* spp.; *5* – *Bruguiera spp., Avicennia spp., Ceriops tagal*; *6* – *Excoecaria agallocha*, *Xylocarpus* spp.; *7* – коралловые постройки. Типы осадка: *8* – ил, илистый песок; *9* – песок; *10* – известняковые плиты, обломки кораллов; *11* – валуны, щебень.

На отметке 1.9–2.0 м над уровнем моря проходит внешняя граница мангрового леса. На внешнем, мористом краю зарослей доминируют виды рода ризофора (обычно *Rhizophora mucronata*, с участием *Rh. apiculata*, *Rh. stylosa*). Иногда в этой зоне на переднем краю леса встречаются также виды рода *Avicennia* (ст. 5). Ближе к берегу в состав мангров входят виды рода *Bruguiera* (преимущественно *B. gimnorrhyza*), *Ceriops tagal*, *Sonneratia alba* и *Avicennia* (*A. alba, A. marina*). Обобщенный профиль литорали и точки отбора проб показаны на рис. 2.

На каждой станции пробы отбирались в двух биотопах – на открытом грунте риф-флета (на всех рисунках и в таблицах обозначены индексом “1” после номера станции) и в мангровых зарослях, собранный между опорными корнями ризофоры (эти пробы обозначены индексом “2”). На всех станциях пробы были отобраны между корней ризофор, формирующих первую, мористую полосу мангровой растительности, на станции 5 дополнительно отобраны пробы также в корнях авицений, также из внешней полосы леса (индекс “3”). Пробы отбирались пластиковым шприцом площадью 3 см^2 на глубину 5 см в трех повторностях в пределах 1 м^2 в каждом биотопе. При обработке пробы были объединены, а все данные приведены к стандартной размерности экз/10 см^2. Пробы были зафиксированы нейтрализованным 4% формалином. В лаборатории организмы были экстрагированы методом центрифугирования в левазиле с окраской бенгальским розовым. Численность организмов в пробах с точностью до крупных таксонов была подсчитана, далее нематоды и гарпактициды были переведены на постоянные препараты для таксономического анализа.

Гранулометрический анализ осадков (рис. 3) показал различие в составе грунта между

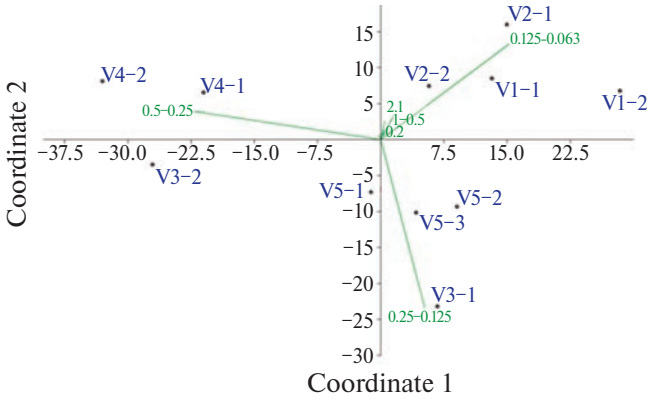

Рис. 3. Ординация станций по гранулометрическому составу осадков (канонический анализ соответствия). Вектора пропорциональны вкладу отдельных фракций.

станциями: модальная фракция на станциях 1 и 2 – крупный алеврит (125–63 мкм), на станции 4 – среднезернистый песок (500–250 мкм), на ст. 5 – мелкозернистый песок (250–125 мкм). На станции 3 модальная фракция на открытом грунте – мелкозернистый песок, в манграх – мелко- и среднезернистый песок. Таким образом, в большинстве случаев различия в составе грунта больше между станциями, чем между отдельными биотопами в одной бухте.

При статистической обработке материала применялись стандартные процедуры и методы, реализованные в программных пакетах PAST v. 4.08 и PRIMER v.7. Помимо стандартных оценок видового разнообразия (общее число видов, число видов на пробы, индекс концентрации доминирования *D*, выровненности видов по обилию *J*), для определения степени изученности фауны использована поправка А. Чао (Chao-2), базирующаяся на оценке доли уникальных видов [10]. Для оценки степени сходства фаун между пробами и станциями использован индекс Жаккара, для оценки сходства структуры выборок – индекс Брея–Кёртиса. Для сравнения относительного вклада межбиотопической (биотопы ризосферы ризофор и песка на риф-флете) и географической (отдельные станции) изменчивости использовался непараметрический алгоритм сравнения PERMANOVA [7], оценивающий вариабельность структуры населения (на основе индекса Брея–Кёртиса) по каждой из переменных отдельно. Для сравнения матриц сходства структуры таксоценов между собой и с факторами среды использован тест Мантеля [18], оценивающий вероятность совпадения структуры матриц по индексу Брея–Кёртиса для биологических переменных и эвклидова расстояния для состава грунта. Для выявления вклада таксонов (и экологических групп видов) в разделение выборок использована стандартная процедура SIMPER, а также предложенный [13] “индекс индикаторных видов” – INDVAL, рассчитанный как произведение “специфичности” вида (отношение среднего числа особей вида в выделенной группе проб (мангры или песок в нашем случае) к сумме средних значений во всех группах) и “верности” вида (доля проб в группе, в которых вид отмечен). Выявление характерных видов, таксонов и экологических групп видов базировалось на сопоставлении результатов, полученных этими двумя методами.

Для оценки зависимости сходства видовой структуры от расстояния меду пробами использована оригинальная программа, разработанная А.И. Азовским (МГУ).

При таксономическом анализе нематод объемы таксонов приняты в соответствии с базой данных Nemys [19], для гарпактикоидных копепод – с базой данных WoRMS [23]. Семейства гарпактикоид Conuellidae и Longipediidae в настоящее время выделены в отдельный отряд копепод Polyarthra. При анализе жизненных форм гарпактикоид принято их разделение на группы в соответствии с их морфологией и образом жизни [5, 6, 17]: эпибентосные, неспецифические интерстициальные (они могут жить и в капиллярных пространствах, и как эпибентосные); интерстициальные; роющие; фитальные; планктонные. Классификация нематод по типам питания базируется на схеме В. Визера с некоторыми модификациями [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Доминирующие группы мейобентоса во всех пробах – это нематоды и гарпактициды. Нематоды обеспечивают от 70 до 96% общей численности многоклеточного мейобентоса, на долю гарпактицид приходится в среднем менее 10%. В составе мейобентоса также отмечены в небольшом числе кининорхи, остракоды, тихоходки, псевдомейобентос представлен молодью полихет, двустворчатых моллюсков и гастропод. Суммарная численность мейобентоса (табл. 1) варьировала в широких пределах и в мангровых зарослях, и на открытом грунте. Средние значения плотности поселений основных групп, нематод и гарпактицид были несколько выше на песках риф-флета (730 и 92 экз/10 см^2), чем в мангровых зарослях (549 и 39 экз/10 см^2), но большие различия между отдельными пробами не позволяют считать эти различия существенными. Коэффициенты вариации плотности для нематод и гарпактицид в пробах составляли 68 и 85% соответственно.

Население литорали островов отличается высоким таксономическим разнообразием. В составе фауны свободноживущих нематод выявлено 123 вида, принадлежащих 70 родам и 31 семейству. Фауна гарпактицид включает 36 видов из 13 семейств. При этом фауна выявлена далеко не полностью – критерий Чао-2 предсказывает 216 видов нематод и 52 вида гарпактикоидных копепод.

Сравнение станций по видовому составу, как нематод, так и гарпактицид, приводит к неочевидным результатам – станции группируются случайным образом, межбиотопические различия замаскированы большим числом уникальных для каждой станции видов (рис. 4). При этом не

Таблица 1. Плотность поселений мейобентоса в разных биотопах

Биотоп	Открытый грунт						Ризосфера мангров*						
Станция	1–1	2–1	3–1	4–1	5–1	*M* ± *st.dev.*	1–2	2–2	3–2	4–2	5–2	5–3	*M* ± *st.dev.*
Эумейобентос, в т. ч.:	**1863**	**134**	**790**	**463**	**878**	825 ± 650	**917**	**736**	**387**	**516**	**388**	**427**	588 ± 218
Nematoda	1686	95	643	421	804	730 ± 597	870	688	370	463	353	407	549 ± 208
Harpacticoida	176	36	147	29	74	92 ± 66	47	47	17	50	35	20	39 ± 14
Ostracoda	1					1							
Kinoryncha		3		13		8 ± 7		1		3			2 ± 1
Псевдомейобентос, в т. ч.:	**101**	**1**	**5**	**141**	**7**	51 ± 65	**33**	**1**	**0**	**36**	**21**	**7**	18 ± 16
Polychaeta	100		5	141	7	63.25 ± 68	23			33	18	7	25 ± 10
Bivalvia	1	1				1	7			3	3		4 ± 2
Gastropoda							3	1					2 ± 1

*) везде, кроме ст. 5–3 – виды рода *Rhizophora*, 5–3 – под кроной авицении среди пневматофоров. *M* ± *st.dev.* – среднее и стандартное отклонение.

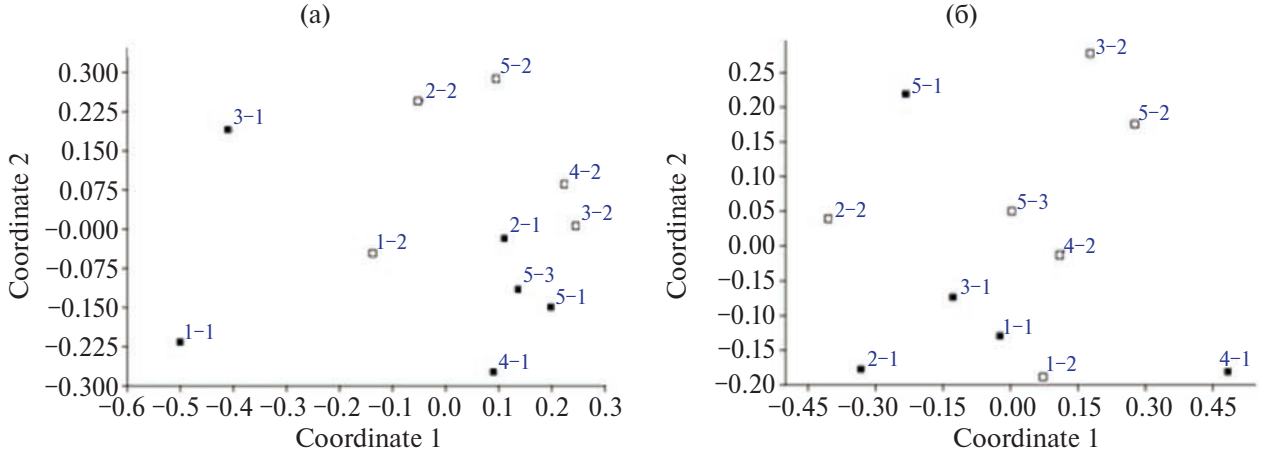

Рис. 4. Результаты МДС-анализа для структуры поселений нематод (а) и гарпактицид (б). Пробы из мангровых биотопов обозначены белыми квадратами, с открытого грунта – черными.

выявлено связи между структурой таксоцена нематод и таксоцена гарпактикоид ни на одном из уровней таксономической иерархии. Тест Мантеля не показал достоверных корреляций между матрицами видов, семейств и отрядов. Две наиболее разнообразные группы мейобентоса распределены в исследованных биотопах независимо друг от друга.

Среднее значение индекса Жаккара (доля общих видов в сравниваемых выборках) для таксоценов нематод составляет 0.19, для таксоценов гарпактицид – 0.07; значения индекса Брея-Кёртиса (сравнение выборок с учетом структуры доминирования) равны 0.17 и 0.06 соответственно. Среднее число видов на пробу составляет для нематод 27.3, т. е. около трети от суммарного числа видов; для гарпактицид – 6 (25% от общего числа видов). Все пробы характеризуются низкой концентрацией доминирования (*D*) и высокой выровненностью видов по обилию (табл. 2).

Основной вклад в разнообразие связан с географическим положением (“станция”), а не с различиями между биотопами мангров и песка на риф-флете. И для нематод, и для гарпактицид вклад различий между станциями почти в четыре раза больше, чем для различий между биотопами (результаты теста PERMANOVA между выборками по двум переменным “биотоп” и “станция” с использованием индекса Брея–Кёртиса приведены в табл. 3). Каждая бухта обладает своим набором видов, из которого формируется население каждого из биотопов. Это подтверждает и отсутствие зависимости “сходство – расстояние” для проб, собранных в разных точках архипелага (рис. 5).

Анализ различий между песками риф-флета и межкорневыми пространствами ризофор на видовом и родовом уровнях оказался неинформативным и для гарпактицид, и для нематод. Станции группировались произвольным образом:

Таблица 2. Показатели видового разнообразия нематод и гарпактикоидных копепод в пробах

Показатель	1–1	2–1	3–1	4–1	5–1	1–2	2–2	3–2	4–2	5–2	5–3
	Нематоды										
Число видов	23	29	31	26	25	29	34	24	24	28	19
Число особей	117	74	86	89	114	119	92	124	96	99	112
Индекс концентрации доминирования Симпсона	0.75	0.96	0.93	0.90	0.85	0.92	0.95	0.92	0.90	0.93	0.81
Индекс Шеннона *H*	2.2	3.3	3.2	2.9	2.5	2.9	3.3	2.7	2.7	3.0	2.2
Выравненность	0.39	0.95	0.77	0.71	0.47	0.61	0.82	0.66	0.62	0.72	0.47
	Гарпактикоидные копеподы										
Число видов	11	6	8	1	8	4	8	3	9	4	5
Число особей	56	23	57	2	52	15	14	8	17	17	15
Индекс концентрации доминирования Симпсона	0.85	0.46	0.79	0	0.82	0.6	0.91	0.68	0.92	0.67	0.78
Индекс Шеннона *H*	2.1	1.1	1.8	0	1.9	1.1	2.2	1.1	2.3	1.2	1.5
Выравненность	0.73	0.49	0.75	1	0.80	0.77	1.15	1.00	1.13	0.86	0.94

Таблица 3. Сравнительный вклад межбиотопической (“site”) и географической (“station”) компонент в пространственную вариацию структуры таксоценов (результаты непараметрического многомерного дисперсионного анализа (PERMANOVA) для таксоценов нематод и гарпактикоидных копепод на основе индекса Брея–Кёртиса)

Two-way PERMANOVA (Permutation N: 9999)

Nematoda

Source	Sum of sqrs (rate of total)	*df*	Mean square	*F*	*p*
“biotope”	0.385934 (0.107)	1	0.38593	1.1752	0.273
“site”	1.45706 (0.434)	4	0.36426	1.1092	0.3224
Interaction	1.18666	4	0.29666	0.90337	0.6619
Residual	0.328396	1	0.3284		
Total	3.358	10			

Harpacticoida

Source	Sum of sqrs	*df*	Mean square	*F*	*p*
“biotope”	0.523783 (0.121)	1	0.52378	1.1919	0.2429
“site”	1.88318 (0.435)	4	0.47079	1.0713	0.2973
Interaction	1.47755	4	0.36939	0.84056	0.7911
Residual	0.439453	1	0.43945		
Total	4.324	10			

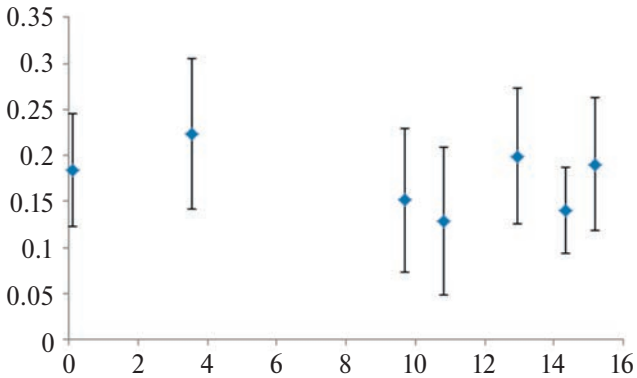

Рис. 5. Зависимость сходства проб от расстояния между ними для нематод. Приведены средние значения индексов Брея–Кёртиса и стандартные отклонения. По оси *X* – расстояния, км, по оси *У* – значения индекса.

ни по типам биотопов, ни по положению в пространстве. Большое видовое разнообразие, низкая общность видового состава между отдельными бухтами и островами, большое число видов, уникальных для отдельных проб, затрудняют содержательный анализ.

Одним из возможных способов редуцировать разнообразие – это объединение видов в таксоны более высокого ранга. В табл. 4 приведены показатели “верности” таксонов нематод для зарослей ризофоры и риф-флета на нескольких уровнях таксономического разрешения. Видно, что средний показатель “верности”, т. е. степени приуроченности таксонов к одному из биотопов, растет в ряду от видов к семействам. Это, а также то, что средние значения индекса Брея–Кёртиса

возрастают в ряду виды–роды–семейства в качестве анализируемых переменных (0.17; 0.25; 0.46), позволяет ранжировать семейства по степени их приуроченности к различным биотопам (табл. 5).

Для нематод на уровне семейств выявляется в биотопах чистого песка преобладают семейства Oncholaimidae, Thoracostomopsidae, Anticomidae, Oxystominidae, в мангровых биотопах более обычны такие семейства как Linhomoeidae, Chromadoridae, Microlaimidae, Anoplostomatidae. Десмодориды (Desmodoridae) обычны в обоих биотопах, но различия проявляются на уровне подсемейств: при общем преобладании п/сем. Spiriniinae, их относительное обилие выше в биотопах чистого песка, в то время как в манграх более обычны представители п/сем. Stilbonematinae и, в меньшей степени, Desmodorinae.

Для гарпактицид анализ эти методом позволяет выявить относительную приуроченности таких семейств, как Miraciidae, Longipediidae и Ectinosomatidae к песчаным пляжам (значения индекса более 50%). Специфичных для мангров семейств не выявляется, значения индекса INDVAL нигде не достигают 50%.

Другой способ генерализации данных по разнообразию – это анализ жизненных форм. Для гарпактицид различия в спектрах жизненных форм проявляются достаточно отчетливо (рис. 6). В обоих биотопах доминируют эпибентосные формы, составляя более половины суммарной численности. Разнообразие жизненных форм выше в мангровых биотопах, преимущественно, за счет более заметного участия интерстициальных форм, а также присутствия фитальных видов, отсутствующих на отрытом песке. На песках риф-флета больше доля роющих видов и неспецифически интерстициальных форм. Основной причиной различий в спектрах жизненных форм по станциям можно считать вариации состава осадка, что подтверждает тест Мантеля, показывающий при сравнении матриц эвклидовых расстояний для состава грунта и коэффициентов сходства Брея–Кёртиса для жизненных форм гарпактицид небольшую, но достоверную положительную корреляцию (R = 0.237; p (uncorr; onetailed) = 0.09).

Для нематод не существует разработанной системы жизненных форм, но традиционно используется трофическая классификация по морфологическим признакам. Структура трофических типов в двух биотопах не так сильно различается, как по наборам жизненных форм гарпактицид, но некоторые отличия видны (рис. 7). На чистом песке относительно больше численность нематод, относящихся к хищным или всеядным (2B) и неселективных фито- и бактериофагов с обширной ротовой полостью (1B), в то время как в мангровых биотопах больше селективных бактериофагов (1A) и фитофагов-соскребывателей (2A).

Таблица 4. Средние значения индекса “верности” для нематод на разных таксономических уровнях

Таксон	Открытый грунт	Мангры
Семейства	0.42	0.37
Подсемейства	0.38	0.35
Роды	0.30	0.31
Виды	0.22	0.21

Таблица 5. Семейства нематод и гарпактикоид, приуроченные к разным биотопам (максимальные значения показателя *IndVal*, значения индекса > 50 выделены жирным шрифтом)

Nematoda			
Открытый грунт		Мангры	
Семейство	*IndVal*	Семейство	*IndVal*
Oncholaimidae	**68.32**	**Linhomoeidae**	**66.67**
Thoracostomopsidae	**53.33**	**Chromadoridae**	**64.1**
Anticomidae	**50.77**	**Microlaimidae**	**50.4**
Desmodoridae	49.68	**Desmodoridae**	**50.32**
Oxystominidae	46.67	Anoplostomatidae	45
Harpacticoida			
Canuellidae	**69.47**	Dactylopusiidae	40
Miraciidae	**68.66**	Harpacticidae	40
Longipediidae	**60**	Ameiridae	34.29
Cletodidae	**57.3**	Miraciidae	25.07
Ectinosomatidae	**56.25**	Cletodidae	22.7

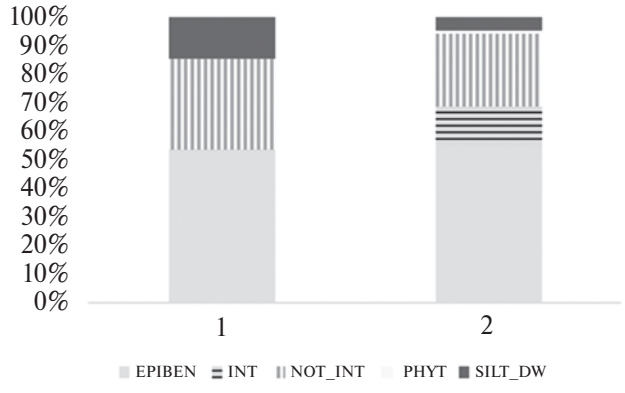

Рис. 6. Соотношение жизненных форм гарпактикоид в биотопах открытого грунта (1) и мангров (2). EPIBEN – эпибентосные, INT – интерстициальные, NOT_INT – неспецифические интерстициальные, PHY – фитальные, SILT_DW – роющие.

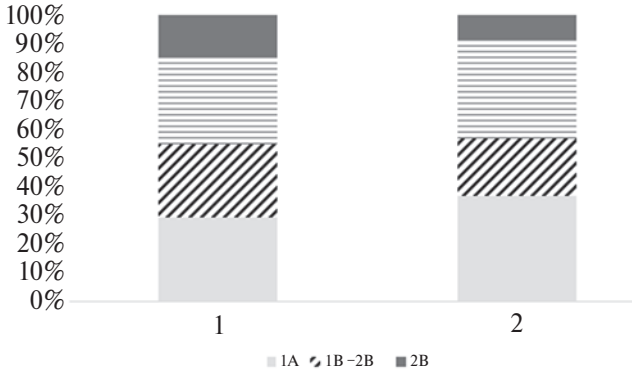

Рис. 7. Соотношение трофических групп нематод в биотопах открытого грунта (1) и мангров (2).

Для проверки гипотезы о том, что степень влияния мангров на состав мейофауны зависит от типа их корневой системы, на одной из станций (ст. 5) в дополнения к пробам из ризосферы ризофор были собраны дополнительные пробы в корневой системе второго массового вида мангров – *Avicennia marina*. Заглубленные корни авиценнии должны в меньшей степени изменять условия для мейобентоса в верхних сантиметрах осадка, и соответственно меньше влияют на структуру мейобентосного населения. Полученные данные подтвердили это: и для нематод, и для гарпактицид сходство структуры населения в пробах на риф-флете и под кронами авицений было намного выше, чем между этими пробами и населением в корнях ризофоры (рис. 8а, б).

Ограниченный видовой состав одного пляжа позволяет надежнее выявлять вклад отдельных таксонов в эти различия. Своеобразие таксоцена нематод ризосферы ризофоры определяется доминированием здесь видов рода *Tershellingia*, при большом участии *Microlaimus* spp. и *Linhmoeus* spp., тогда как в двух остальных биотопах доминирующий комплекс составляют виды родов *Oncholaimus* и *Daptonema*. Сохраняются, соответственно, и различия в обилии массовых семейств: на песке и в авиценнии отчетливо доминируют Oncholaimidae и Xyalidae (при полном отсутствии в корнях ризофоры), в ризофоре доминирующее семейство – Linhomoeidae, доля которых на отрытом песке и в корнях авиценнии в два с половиной раза меньше. Из-за небольшого объема выборок, для гарпактикоидных копепод такие же различия в структуре поселений проявляются только при анализе жизненных форм: пробы из-под ризофор отличаются большей долей участия эпибентосных форм и меньшим вкладом роющих видов.

ОБСУЖДЕНИЕ

На островах Кондао мы наблюдаем однотипное устройство литорали бухт архипелага, разорванных участками открытого прибойного берега. Мы не наблюдаем здесь обычного для мангровых зарослей заиления. Осадки в разных бухтах различаются, и различия между бухтами в большинстве случаев больше, чем между биотопами в одном заливе. Количественные характеристики мейобентоса литорали островов укладываются в пределы, указанные для мангровых лесов южного побережья Вьетнама [20]. Несмотря на хорошую в целом изученность фауны нематод побережий Вьетнама [14], сборы с островов Кондао принесли ряд видов и даже родов, не указанных прежде для материкового побережья.

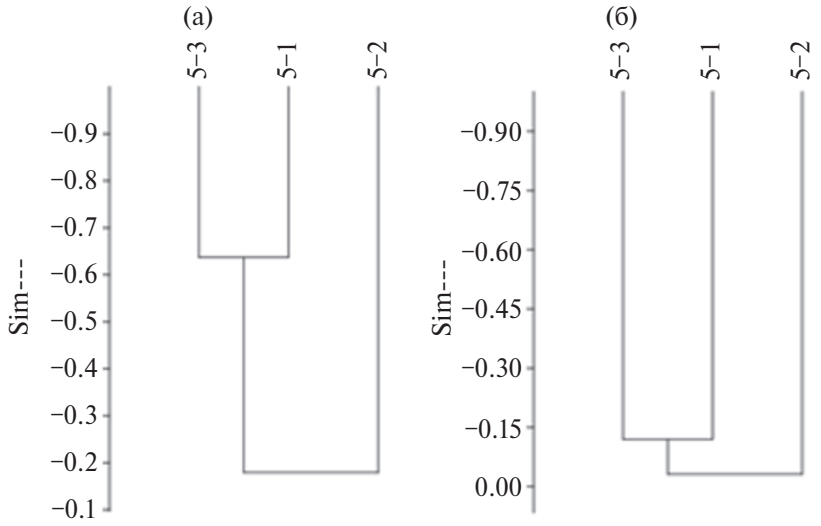

Рис. 8. Сходство выборок по видовой структуре (индекс Брея–Кёртиса) для нематод (а) и гарпактикоидных копепод (б), обитающих в разных биотопах станции 5 (5–1 – открытый грунт; 5–2 – ризосфера ризофоры; 5–3 – ризосфера авиценнии).

Следует полагать, что причина здесь не столько в своеобразии островной фауны, сколько в общей недоизученности фауны нематод побережья [16].

Фауна гарпактикоид и структура сообществ в Южно-Китайском море наиболее детально описана для двух районов – для залива Нячанг в Центральном Вьетнаме [4, 11] и для архипелага Катба в Северном Вьетнаме [12]. Там наибольшим разнообразием отличаются таксоцены копепод, приуроченные к промытым пескам и алевритовым пескам с детритом, наименьшим – в илистых отложениях [12], а мангровые леса не оказывают существенного влияния на структуру таксоценов гарпактоид. Это не совпадает с результатами, полученными нами для населения нематод тех же районов [3] и для обеих групп мейобентоса на архипелаге Кондао: структура таксоценов и нематод, и гарпактикоид (см. рис. 8) существенно различалась в зарослях ризофор и на риф-флете. В то же время различия в пространственном распределении таксоценов двух ведущих групп мейобентоса отчетливо проявились в настоящем исследовании – было показано независимое распределение этих двух групп по биотопам литорали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокое видовое разнообразие, большое число редких видов, уникальных для отдельных проб, характерно для таксоценов массовых групп мейобентоса литорали умеренных и тропических широт. Такой характер исходных данных затрудняет их анализ, в частности, оценку межбиотопических различий между таксоценами и выявление особенностей структуры видовых комплексов в разных биотопах. Одним из способов преодолеть эту трудность является уменьшение таксономического разрешения, использование в качестве переменных не видов, а более высоких таксономических категорий, например, родов [12] или семейств, как это сделано в настоящей работе. Применение метода индикаторных видов [13] и связанных с ним расчетных характеристик позволяет оценить степень приуроченности таксономических категорий разного ранга к двум типам биотопов и выявить наборы таксонов, характерных для мангровых зарослей или для биотопа открытого грунта. Другой способ базируется на анализе спектров жизненных форм [8, 22], что может помочь выявлению не только межбиотопических различий, но и отслеживать изменения сообществ во времени при изменении состава осадков литорали. Для нематод более показательным был анализ состава надвидовых таксонов, а для гарпактицид – наборы жизненных форм в разных биотопах.

ВЫВОДЫ

На островах архипелага Кондао, при изучении разнесенных в пространстве бухт с развитым риф-флетом и богатой мангровой растительностью, наибольший вклад в суммарное таксономическое разнообразие вносят различия между бухтами, т. е. пространственный компонент или гамма-разнообразие. Вклад различий между биотопами существенно меньше. При этом роль мангровых деревьев, как эдификаторов, зависит от строения корневой системы: виды рода *Rhizophora* сильнее, чем авиценнии модифицируют состав и структуру мейобентосных сообществ. Высокое видовое разнообразие, выровненность видов по обилию и большое число редких видов затрудняют выявление межбиотопических различий. Более отчетливо различия между мангровыми биотопами и песками риф-флета проявляются на более высоких таксономических уровнях или при сравнении обилия представителей разных экологических групп видов: для нематод наиболее информативным уровнем таксономического разрешения оказалась композиция семейств, а для гарпактицид – спектр жизненных форм.

Благодарности. Авторы благодарны руководству и сотрудникам Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра за предоставленную возможность участвовать в экспедиции. Отдельная благодарность г-же Лан и проф. Т.А. Британаеву за организацию экспедиционных работ на архипелаге.

Источники финансирования. Обработка и анализ материалов поддержаны грантом РФФИ № 21-54-54006 (Российско-Вьетнамское сотрудничество) и Вьетнамской академией наук и технологий (QTRU01.11/21-22).

Декларации. При выполнении работы никакие опыты над людьми или животными не проводились. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Звонарева С.С., Кантор Ю.И., Нгуйен Т.Т.Х., Британаев Т.А.* Разнообразие и многолетняя динамика макробентоса в мангровых посадках и естественных ассоциациях провинции Кхань Хоа, Вьетнам // Зоологический журнал. 2020. Т. 99. № 7. С. 772–783.

2. *Мокиевский В.О.* Экология морского мейобентоса. М.: КМК, 2009. 288 с.
3. *Мокиевский В.О., Чесунов А.В., Удалов А.А., Нгуен З.Т.* Количественное распределение мейобентоса и структура сообщества свободноживущих нематод мангровой литорали в заливе Нячанг (Вьетнам) Южно-Китайского моря // Биология моря. 2011. Т. 37. № 4. С. 262–273.
4. *Чертопруд Е.С., Гомес С., Джерардин Х.* Фауна и разнообразие таксоценов Harpacticoida (Copepoda) Южно-китайского моря // Океанология. 2009. Т. 49. № 4. С. 532–542.
5. *Чертопруд Е.С., Чертопруд М.В., Гарлицкая Л.А. и др.* Пространственная изменчивость структуры таксоценов ракообразных Harpacticoida (Copepoda) литорали и мелководий морей Европы // Океанология. 2007. Т. 47. № 1. С. 59–68.
6. *Чертопруд Е.С., Чертопруд М.В., Кондарь Д.В. и др.* Разнообразие таксоценов Harpacticoida (Copepoda) песчано-илистой литорали Кандалакшского залива Белого моря // Океанология. 2006. Т. 46. № 4. С. 527–536.
7. *Anderson M.J.* A new method for non-parametric multivariate analysis of variance // Austral Ecology. 2001. V. 26. P. 32–46.
8. *Azovsky A.I., Chertoprud E.S., Garlitska L.A.* Environmental stability and long-term variability of harpacticoid copepod assemblages // Marine Biology. 2022. V. 169. Iss. 5. Art. 67. https://doi.org/10.1007/s00227-022-04059-2
9. *Beauchard O., Veríssimo H., Queirós A.M., Herman P.M.J.* The use of multiple biological traits in marine community ecology and its potential in ecological indicator development // Ecological indicators. 2017. V. 76. P. 81–96.
10. *Chao A.* Estimating the population size for capture-recapture data with unequal catchability // Biometrics. 1987. V. 43. P. 783–791.
11. *Chertoprud E.S., Gheerardyn H., Gómez S.* Harpacticoida (Crustacea: Copepoda) of the South China Sea: faunistic and biogeographical analysis // Hydrobiologia. 2011. V. 666. P. 45–57.
12. *Chertoprud E.S., Gheerardyn H., Gomez S.* Community structure of harpacticoid copepods in intertidal and shallow-water habitats of Cat Ba archipelago (Vietnam, South China Sea) // J. Mar. Biol. Ass. U.K. 2013. V. 93. No. 1. P. 95–105.
13. *Dufrene M., Legendre P.* Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach // Ecological Monographs. 1997. V. 67. P. 345–366.
14. *Gagarin V.G.* An annotated checklist of the free-living nematodes from mangrove thickets of Vietnam // Zootaxa. 2018. V. 4403. No. 2. P. 261–288.
15. *Ghosh M., Mandal S.* Does vertical distribution of meiobenthic community structure differ among various mangrove habitats of Sundarban Estuarine System? // Regional Studies in Marine Science. 2019. V. 31. P. 100778. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100778
16. *Gusakov V.A., Gagarin V.G., Dinh C.N. Daptonema brzeskii* sp. n. and *D. rivale* sp. n. (Nematoda, Monhysterida, Xyalidae) from Mekong River Mouth, Vietnam // Inland Water Biology. 2023. V. 16. No. 3. P. 404–412.
17. *Hicks G., Coull B.* The ecology of marine meiobenthic harpacticoid copepods // Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev. 1983. V. 21. P. 67–175.
18. *Mantel N., Valand R.S.* A technique of nonparametric multivariate analysis // Biometrics. 1970. V. 26. P. 547–558.
19. Nemys eds. Nemys: World Database of Nematodes. Accessed at https://nemys.ugent.be on 2023-08-18. doi:10.14284/366.
20. *Nguyen D.T., Pham T.M., Nguyen T.X.P. et al.* Meiobenthos communities for different mangrove types in Can Gio Biosphere Reserve, Vietnam // Научные труды Дальрыбвтуза. 2017. Т. 41. С. 74–84.
21. *Ridall A., Ingels J.* Suitability of free-living marine nematodes as bioindicators: Status and future considerations // Frontiers in Marine Science. 2021. V. 8. Art. 685327.
22. *Semprucci F., Grassi E., Balsamo M.* Simple is the best: an alternative method for the analysis of free-living nematode assemblage structure // Water. 2022. V. 14. No. 7. Art. 1114. https://doi.org/10.3390/w14071114
23. WoRMS Editorial Board. World Register of Marine Species. Accessed at https://www.marinespecies.org at VLIZ on 2023-08-18. doi:10.14284/170.

MEIOBENTHOS OF CON DAO ISLANDS (VIETNAM): DIFFERENCES IN COMMUNITIES' STRUCTURE BETWEEN REEF-FLAT AND MANGROVES

V. O. Mokievsky[a, *], A. V. Tchesunov[b], D. V. Kondar[a], L. A. Garlitska[a], Nguyen Dinh Tu[c], Nguyen Thị Xuan Phuong[c]

[a] P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, 117997, Russia
[b] Biological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia
[c] Institute of Ecology and Biological Resources, VAST, Hanoi, Vietnam
** e-mail: vadim@ocean.ru*

The results of meiobenthic survey on Con Dao Archipelago (Vietnam) is present. Samples were collected in five locations in mangroves and on the adjacent reef-flat. Quantitative date form meiobenthos is given along with taxonomic composition of two most abundant groups^ nematodes and harpacticoids. High species diversity occurs in two main groups – harpacticoid copepods and free-living nematodes. High level of species diversity together with a large number of singleton species prevents direct comparison on the species level and makes it non-informative. The general characters (composition of families and the spectra of live-forms) are more informative. The taxonomic composition of each of the studied bays were shown, inter-biotopic differences make a smaller contribution to the overall diversity, i. e. each bay has its own set of species, from which the population of each of the biotopes is formed with no respect to the distance.

Keywords: mangroves, meiobenthos, nematodes, harpacticoids, Vietnam

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 616–628

МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ

УДК- 595.384.2–116(268.45+268.52)

ТРАВМИРОВАННОСТЬ КАК ИНДИКАТОР ПЛОТНОСТИ ПОПУЛЯЦИИ И ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОМЫСЛА КРАБА-СТРИГУНА ОПИЛИО (*CHIONOECETIS OPILIO*) В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

© 2024 г. С. В. Баканев

Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии ("ПИНРО" им. Н.М. Книповича), Мурманск, Россия

e-mail: bakanev@pinro.vniro.ru

Поступила в редакцию 28.08.2023 г.
После доработки 20.12.2023 г.
Принята к публикации 28.12.2023 г.

Представлен анализ динамики травмированности краба-стригуна опилио в уловах, полученных в ходе научно-исследовательских съемок в 2008–2022 гг., а также наблюдателями в ходе промысла этого вида в российской части Баренцева моря в 2014–2022 гг. Средняя доля травмированных особей в уловах научно-исследовательских съемок возросла с 5–11% в 2008–2010 гг. до 45% в 2022 г. Прирост доли травмированных особей выше у крупных самцов. Результаты моделирования показали, что увеличение доли травмированности особей в период, предшествующий промысловой эксплуатации, связан с увеличением внутрипопуляционного взаимодействия животных, а в период активной промысловой эксплуатации – с промысловым прессом на популяцию, когда в процессе обработки улова часть особей, в том числе травмированных при поимке, возвращаются в море.

Ключевые слова: краб-стригун опилио, Баренцево море, травмированность конечностей, плотность популяции, интенсивность промысла

DOI: 10.31857/S0030157424040062, **EDN:** PRRKFD

ВВЕДЕНИЕ

Краб-стригун опилио (*Chionoecetes opilio* (Fabricius, 1788)) является широко распространенным видом, чей ареал охватывает воды трех океанов: Тихого, Атлантического и Северного Ледовитого [5, 12, 17, 20, 22, 43, 52]. В современный ареал объекта входят также воды Баренцева и Карского (западная часть) морей, где особи, начиная с последних десятилетий XX в., образуют достаточно стабильные скопления [8, 9, 15, 21]. Результаты систематического мониторинга в Баренцевом море в начале XXI в. показывают, что краб-стригун опилио образовал самовоспроизводящуюся популяцию, занимающую обширную акваторию. За период исследований в 2005–2022 гг. площадь распространения этого вида увеличилась более чем в 10 раз, а численность возросла на три порядка, достигнув промысловой значимости [2, 22].

Несмотря на сравнительно длительную историю акклиматизации и биомониторинга опилио в Баренцевом море, до настоящего времени многие вопросы его биологии, в том числе важные для промысла, остаются малоизученными. В литературе отсутствуют оценки популяционного роста, пополнения и смертности; динамики линочных процессов; степени травматизма особей в популяции, а использующиеся характеристики носят фрагментарный характер [22]. Многие биологические параметры (например, пополнение или смертность), отражающие состояние популяции, недоступны для прямого наблюдения и для их оценки требуется как многолетний мониторинг, так и специальный математический аппарат. Однако некоторые биологические показатели возможно без труда оценить посредством прямого полевого анализа уловов научно-исследовательских съемок или промысла. Одним из таких критериев, отражающим состояние популяций десятиногих ракообразных, в том числе крабов-стригунов опилио, могут служить данные по распространенности среди представителей того или иного вида из разных мест обитания животных с травмированными ходильными конечностями [42]. Отсутствие конечностей, а также травмированность у промысловых ракообразных

может быть связана как с процессами аутотомии, так и влиянием антропогенных факторов. Аутотомия у членистоногих широко распространена, чему способствует сильная сегментированность тела [30, 31, 33, 38, 54]. Процессы аутотомии ракообразных были хорошо изучены в прошлом веке [34, 49, 50, 56]. Высокая доля травмированных особей без конечностей может свидетельствовать как об острых внутрипопуляционных взаимодействиях, когда крупные особи "подавляют" мелких [36, 44, 48], так и неблагоприятных контактах с хищниками [4, 18, 24, 25, 39, 45–47, 53]. Несмотря на значительную роль естественных факторов, причиной утраты конечностей у промысловых ракообразных может быть хэндлинг (от англ. *handling* – различные ручные операции, связанные с выборкой улова из ловушек, сортировкой крабов и частичного возврата их в естественную среду), который может вносить существенный вклад в увеличение доли поврежденных крабов в акваториях их промысла [10]. Кроме того, одним из источников травмированности может являться воздействие трала на бентосные организмы при промысле донных видов рыб и креветок [6, 32, 51]. Таким образом, частота встречаемости крабов без одной, двух и большего количества ног может свидетельствовать как о напряженности внутри- и межвидовых взаимодействий крабов в естественной среде, так и указывать на степень промыслового пресса в эксплуатируемых популяциях.

В настоящей работе впервые выполнен пространственно-временной анализ травмированности крабов-стригунов опилио, вида, стихийно вселившегося в Баренцево море в конце XX в. Изучено влияние естественных и антропогенных факторов на потерю их конечностей, а также предпринята попытка оценить связь травматизма с популяционной плотностью и интенсивностью промысла.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В работе использованы данные Полярного филиала ФГБНУ "ВНИРО" по уловам краба-стригуна в Баренцевом море, полученные в ходе комплексной российско-норвежской экосистемной съемки в 2008–2022 гг., а также данные наблюдателей в ходе промысла этого вида в российской части Баренцева моря в 2014–2022 гг. Кроме того, были использованы данные о первых эпизодических приловах краба-стригуна опилио в 1996–2007 гг., отмеченных в уловах как в ходе научно-исследовательских съемок, так и по данным наблюдателей на донном траловом промысле рыб и креветки.

Ежегодные экосистемные съемки проводились по стандартной методике в летне-осенний период и охватывали большую часть акватории Баренцева моря и прилегающих вод на площади, в средней составляющей около 1500 тыс. км^2 [37]. Сбор материала осуществляли донным тралом Campelen с горизонтальным раскрытием 25 м, вертикальным – 5 м и вставкой в кутовой части изделия с ячеей 22 мм. Количество донных тралений, выполненных за съемку, варьировало от 235 до 493. Анализ уловов опилио в ходе промысла проводился наблюдателем на промысловых судах, оснащенных коническими и трапециевидными ловушками. Количество проанализированных уловов, выполненных за промысловый сезон, варьировало от 33 до 103 (рис. 1; табл. 1).

Сбор и обработку биологического материала выполняли в соответствии с методиками, принятыми в Полярном филиале ФГБНУ "ВНИРО" [13]. Биологический анализ краба-стригуна включал в себя промеры ширины карапакса (ШК)

Таблица 1- Характеристика первичного материала по крабу-стригуну опилио, собранного в ходе экосистемных съемок в 2008–2022 гг. и промысла в 2014–2022 гг. в Баренцевом море

Год	Экосистемные съемки			Промысел	
	Кол-во тралений	Кол-во тралений с крабом	Кол-во биологических анализов	Кол-во проанализированных уловов	Кол-во биологических анализов
2008	452	77	581	–	–
2009	387	66	284	–	–
2010	331	58	386	–	–
2011	401	84	1182	–	–
2012	455	121	1970	–	–
2013	493	132	2756	–	–
2014	304	87	2814	101	13907
2015	335	89	1867	33	4942
2016	311	84	1372	59	10205
2017	350	131	4009	34	4868
2018	235	62	1981	85	13149
2019	322	105	3870	79	9697
2020	459	142	2858	32	4795
2021	341	105	1518	76	10649
2022	301	93	697	103	12901

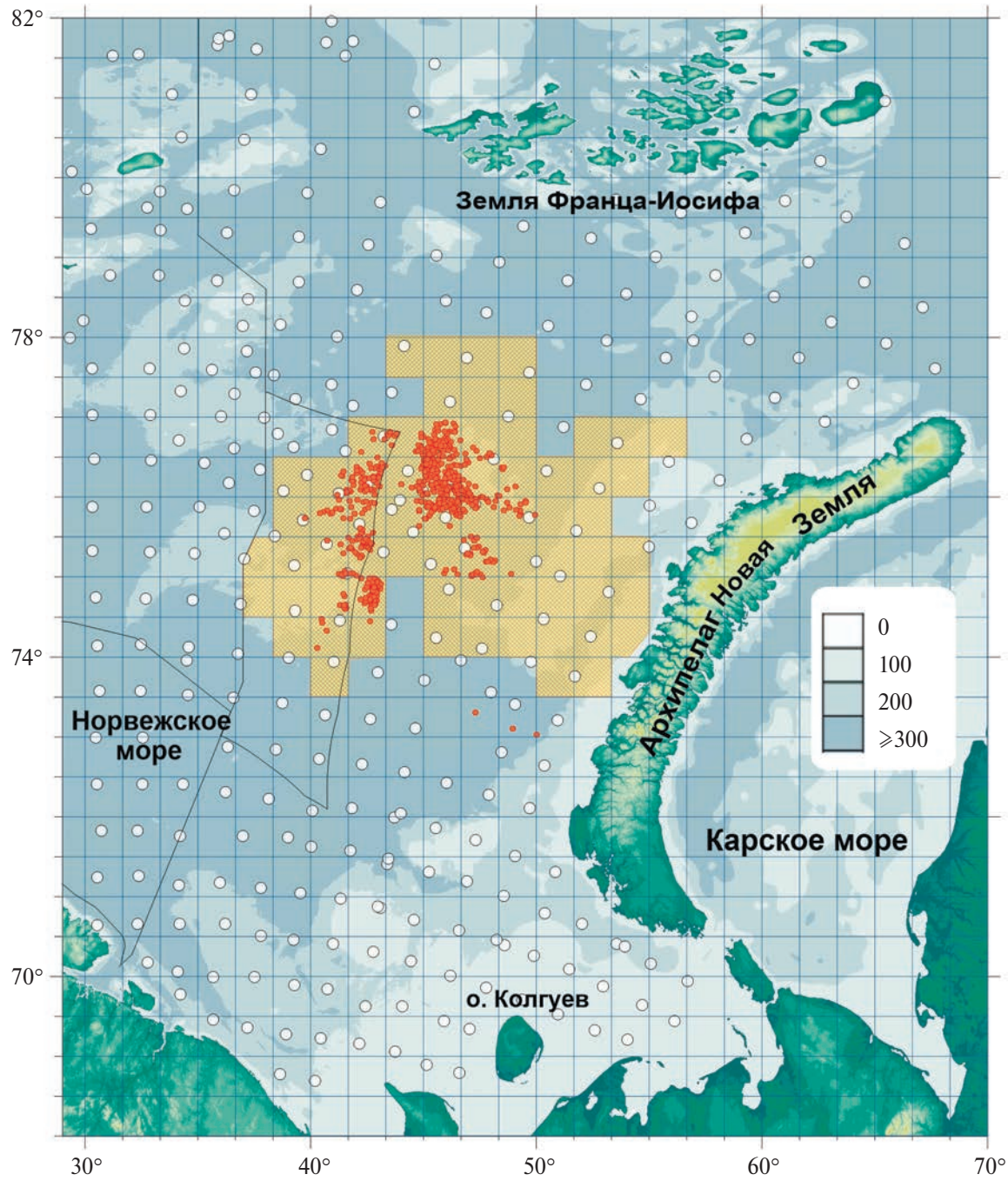

Рис. 1. Положение траловых станций в ходе экосистемной съемки (белые точки) и станций отбора проб наблюдателями (красные точки), а также акватория российского промысла крабов-стригунов опилио (желтые полигоны) в Баренцевом море в 2008–2022 гг.

и высоты клешни у самцов, взвешивание, определение пола, межлиночной категории, состояния конечностей (учитывалась их сохранность, определялись новые или старые травмы, при наличии регенерированной конечности отмечался процент восстановления конечности и наличие язв). Для анализа доли травмированных особей в улове учитывались особи со старыми травмами при которых отсутствовала одна и более конечностей. К промысловым самцам относились крупные особи с шириной карапакса равной и более 100 мм; к непромысловым – особи с меньшими размерами.

Кроме того, для анализа взаимосвязи доли травмированности и антропогенных факторов была использована информация о промысловой деятельности российских и иностранных судов, поступающая через отраслевую систему

мониторинга ВБР от ФГБУ “Центр системы мониторинга рыболовства и связи”. Анализировали информацию по каждой промысловой операции каждого промыслового судна, ведущего ловушечный промысел краба-стригуна опилио и донный траловый промысел рыб и креветки в полигонах, имеющих данные о доли травмированных особей в уловах краба-стригуна опилио в ходе экосистемных съемок и промысла.

Для анализа пространственно-временной взаимосвязи доли травмированных особей с природными и антропогенными факторами акватория Баренцева моря была разбита на полигоны регулярной сеткой с шагом 0.25° с. ш. и 0.5° в. д. Западная часть рассматриваемого участка была ограничена пределами Российской экономической зоны. Северная граница соответствовала 81-й параллели с. ш. Южная и восточная границы соответствовали береговой линии материка и архипелага Новая Земля. Кроме порядкового номера, года и координат, атрибуты полигона для предварительного анализа данных включали в себя зависимую переменную – долю травмированных особей на полигоне – и ряд независимых (объясняющих) переменных. В качестве факторов среды были использованы:

1) глубина (*D*, м), взятая из глобальной геодезической базы данных (http://topex.ucsd.edu/);

2) размер частиц грунта (*S*, мм), полученный на основании оцифровки карт 1933–1943 гг. Государственного океанографического института, а также электронных карт норвежского проекта Mareano (http://www.mareano.no/);

3) придонная температура (*Temp*, °C), горизонтальный градиент температуры (°C/км) и соленость (‰), рассчитанные в каждом полигоне интерполяционным методом Кригинга [23] на основе фактических измерений, полученных в ходе экосистемных съемок последних лет (2010–2022 гг.);

4) скорость (*Speed*, м/с) и направление (*CurDir*, °) течений, рассчитанные с помощью трехмерной численной гидродинамической модели [26] на основе фактических измерений, полученных в ходе экосистемной съемки 2013 г.;

5) средние уловы (*MCC*, кг на морскую милю) всех гидробионтов, а также отдельно по видам или группам видов (краб-стригун опилио, северная креветка, североатлантическая треска, пикша, морская камбала, камбала-ерш, зубатка полосатая, зубатка пестрая, зубатка синяя, скаты), рассчитанные для каждого полигона по годам;

6) средние уловы (*MSCC*, кг на морскую милю) краба-стригуна опилио по размерно-половым категориям (общий улов, улов самцов, самок, непромысловых и промысловых самцов, самок с икрой и без икры);

7) средний размер (*CW*, ширина карапакса, мм) краба-стригуна опилио в уловах в полигоне по годам по данным экосистемных съемок;

8) индекс биомассы краба-стригуна опилио (*B*, тыс. т) в Баренцевом море, рассчитанный с помощью продукционной модели [55].

В качестве антропогенных факторов были использованы:

1) промысловый вылов (т) краба-стригуна опилио в полигоне в году t (*SCC1*), а также суммарный вылов в годах t, $t-1$ (*SCC2*) и t, $t-1$, $t-2$ (*SCC3*);

2) кумулятивный годовой промысловый вылов опилио с начала промысла в 2013–2022 гг. (*CC*);

3) средний улов краба на судо-сутки лова в полигоне в году t (*CPUE*);

4) суммарное время (ч) тралений в ходе донного промысла рыб и креветки в полигоне в году t (*TD1*), а также суммарное время в годах t, $t-1$ (*TD2*) и t, $t-1$, $t-2$ (*TD3*);

5) суммарный вылов (т) гидробионтов в ходе донного промысла рыб и креветки в полигоне в году t (*SCG1*), а также суммарный вылов в годах t, $t-1$ (*SCG2*) и t, $t-1$, $t-2$(*SCG3*).

Предварительный статистический анализ включал построение корреляционной матрицы между переменными и выявление статистически значимых ($p < 0.05$) связей. Корреляционные матрицы строились для долей травмированных самцов и самок в уловах экосистемных съемок для всей акватории российской части Баренцева моря, а также отдельно для районов, где когда-либо наблюдался промысел опилио и отсутствовал таковой.

Далее для моделирования взаимосвязи доли травмированности и статистически значимых факторов из числа перечисленных выше использовали обобщенные и аддитивные модели (GLM и GAM). Процедура выбора наилучшей модели была построена на серии машинных экспериментов, которые сводились к последовательному тестированию вариантов модели, полученных путем различных комбинаций всех предварительно отобранных наборов независимых параметров и типов функций связи. Для итоговых расчетов выбирали модель с наименьшим значением информационных критериев Акаике (AIC) и Шварца (BIC), а также среднеквадратической ошибки (MSE) [1, 16, 28, 29, 35].

Для геостатистических расчетов и тестирования моделей использовали среду R [https://www.R-project.org/] с дополнительными

пакетами *PBSmapping* [https://cran.r-project.org/web/packages/PBSmapping/] и *mgcv* [https://cran.r-project.org/web/packages/mgcv/].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В период первых эпизодических поимок краба-стригуна опилио и в начале его регулярного мониторинга в рамках экосистемных съемок в Баренцевом море в 1996–2005 гг. особи с отсутствующими конечностями регистрировалась регулярно, а их средняя доля в уловах не превышала 14% у самцов и 13% у самок. С 2008 г. опилио начал регулярно встречаться в уловах экосистемных съемок, а средняя доля травмированности крабов ежегодно варьировала скачкообразно, но постепенно возрастала. В начальный период его мониторинга с 2008 по 2011 гг. средняя доля травмированных особей для крабов разных размерных групп варьировала от 5 до 11% для самцов и от 3 до 8% для самок. Снижение средней доли травмированности краба по сравнению с данными первых поимок объясняется высокой долей молоди краба в уловах экосистемных съемок, чья травмированность существенно ниже крупных особей. В уловах 1996–2011 г. ежегодная доля травмированных особей среди крупных промысловых самцов варьировала несущественно в пределах 13–16%, как в приловах специализированных съемок, так и в экосистемных съемках. В 2012–2014 гг., в период вспышки численности популяции, среднегодовая доля травмированных крабов в уловах экосистемных съемок возросла в среднем на 8% для самцов и 10% для самок. При этом доля травмированных промысловых самцов (23–24%) в уловах в экосистемных съемках в период открытия промысла (2013–2014 гг.) весьма близка аналогичным значениям, отмеченным для уловов на промысле краба (25%). С 2016 по 2022 г. наблюдалась тенденция к увеличению среднегодовой доли травмированных особей в уловах как по данным экосистемных съемок, так и в промысловых уловах. В 2022 г. были отмечены максимальные доли травмированных самцов и самок краба-стригуна опилио в уловах в российской части Баренцева моря (рис. 2).

За весь период исследований (2008–2022 гг.) доля травмированных самцов (19%) в среднем была на 3% выше, чем самок. В 2014–2022 гг., т. е. в период промысла, доля травмированных крупных самцов (с ШК 80–150 мм) в уловах экосистемных съемок в среднем была ниже на 2% доли травмированных самцов аналогичных размеров в промысловых уловах. Это, по всей видимости, связано с тем, что экосистемная съемка проводится не только в районах промысла, но и за пределами плотных промысловых скоплений, где существенно ниже антропогенное и внутрипопуляционное воздействие.

Рассмотрим подробно динамику доли травмированных особей по размерно-половым группам в научных и промысловых уловах. В табл. 2 с цветовым градиентом хорошо заметны две закономерности: увеличение доли травмированности самцов с возрастанием ширины карапакса и года.

При этом ежегодный прирост доли травмированных самцов в уловах заметно выше у крупных самцов с ШК 100–130 мм по сравнению с молодью. В среднем доля травмированных увеличивалась на 1.18%; 1.6%; 2.92% ежегодно у самцов с ШК 10–40, 50–90 и 100–133 мм, соответственно. Стоить отметить, что средняя доля травмированных с ШК 10–130 мм в 2018–2019 гг. ниже доли соседних лет по причине высокой пропорции молоди в уловах. Травмированность крупных промысловых особей в этот период постепенно повышалась с 33% в 2016 г. до 45% в 2020 г. Кро-

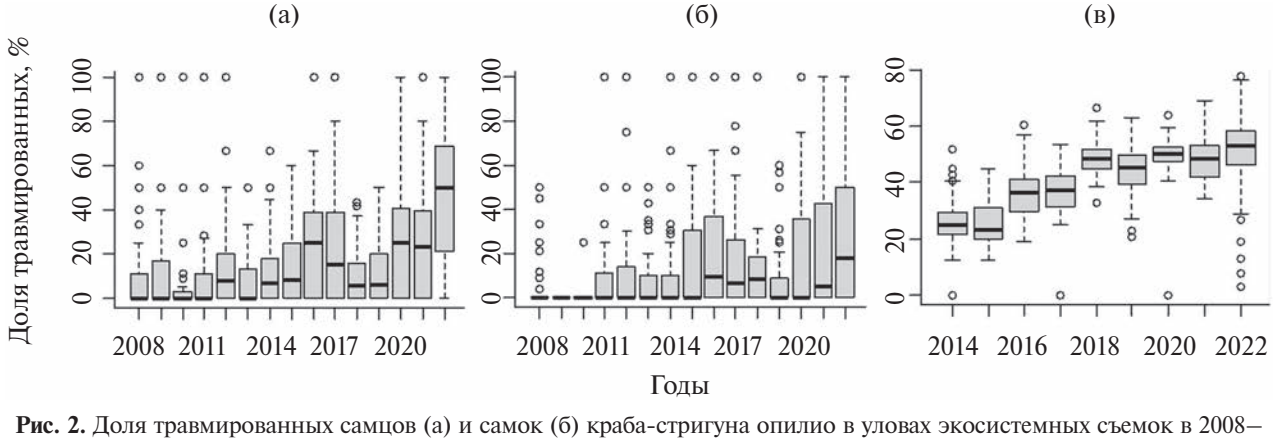

Рис. 2. Доля травмированных самцов (а) и самок (б) краба-стригуна опилио в уловах экосистемных съемок в 2008–2022 гг., а также доля травмированных самцов в уловах на промысле краба-стригуна опилио в Баренцевом море в 2014–2022 гг. (в).

Таблица 2. Средняя доля (%) травмированных особей разных размерных групп (ШК) самцов краба-стригуна опилио в уловах в российских водах Баренцева моря в 2008–2022 гг., оцененные по данным экосистемных съемок

Год/ШК	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	Средняя
2008	0	5	8	3	6	11	9	10	9	11	33	25	50	9
2009	0	10	3	0	20	0	14	0	14	27	23	13		11
2010	1	1	0	8	11	22	13	0	14	30	29	17	0	5
2011	8	4	3	6	9	5	7	17	19	3	16	14	25	8
2012	0	0	6	5	8	18	11	15	21	19	24	18	22	16
2013	3	2	5	7	7	16	16	16	17	25	22	24	23	12
2014	7	3	2	6	19	19	19	25	22	21	15	22	33	14
2015	9	6	12	10	43	33	30	37	16	34	26	28	13	21
2016	0	13	37	36	41	43	41	31	31	43	50	38	0	30
2017	0	2	5	20	18	35	47	48	52	37	32	27	42	26
2018	0	0	3	8	22	15	27	27	23	42	42	18	40	16
2019	0	1	5	7	8	18	26	28	35	44	27	35	39	13
2020	8	5	14	27	35	43	48	52	44	51	44	47	36	36
2021	0	14	17	34	43	48	49	42	43	52	64	19	38	30
2022	0	32	42	47	17	50	55	64	36	55	63	50	67	45
Средняя	2	4	10	14	15	27	28	30	27	32	29	26	32	19

ме того, была отмечена “диагональная” изменчивость доли травмированности, которая выражалась в увеличении доли в 2015, 2016 и 2017 гг. в последовательных размерных классах 50–60 мм, 50–70 мм и 70–90 мм соответственно. Менее четкая тенденция была отмечена в 2020–2022 гг. для размерных групп 40–80 мм по ширине карапакса. Такая закономерность может быть связана с неравномерным влиянием факторов среды или популяционных параметров на степень травматизма отдельных поколений. Например, высокоурожайные поколения образуют скопления высокой плотности, в которые внутрипопуляционные взаимодействия встречаются чаще, чем у поколений низкой численности.

Сходные тенденции в изменчивости доли травмированности были выявлены для самок краба-стригуна опилио в уловах экосистемных съемок (табл. 3). Доля травмированных самок увеличивается с возрастанием ширины карапакса и года. В то же время не наблюдается отчетливой тенденции увеличения ежегодного прироста травмированности у более крупных особей, как это наблюдалось у самцов. Доля самок с отсутствующими конечностями в среднем незначительно ниже (на 0.5%), чем таковая для самцов аналогичных размеров. Однако, в целом, не учитывая размер животных, травмированность самок статистически ниже (на 3%), чем самцов,

Таблица 3. Средняя доля (%) травмированных особей разных размерных групп (ШК) самок краба-стригуна опилио в уловах в российских водах Баренцева моря в 2008–2022 гг., оцененная по данным экосистемных съемок

Год/ШК	10	20	30	40	50	60	70	80	Средняя
2008		5	3	3	0	10	25	10	8
2009			0	0	0	0	0	0	0
2010		0	5	0	0	0	17	0	3
2011	0	4	7	7	6	7	13	7	6
2012	0	0	3	8	9	12	12	16	11
2013	0	2	8	10	10	14	19	7	10
2014	0	4	1	9	14	19	9	14	9
2015	8	8	21	25	36	34	29	29	26
2016	0	16	38	36	40	40	22	0	30
2017	2	2	12	23	32	31	21	22	18
2018	0	1	5	10	24	29	24	28	13
2019	0	2	6	9	5	22	20	28	7
2020	0	4	13	32	43	40	24	78	31
2021	0	14	18	27	39	44	14	100	24
2022	0	13	42	50	38	78	50		39
Средняя	1	5	13	16	22	26	18	19	16

а для половозрелых особей разница увеличивается до 9%.

Данные о травмированности самцов краба-стригуна опилио на промысле при первичном визуальном анализе показывают положительную корреляцию с годом промысла (табл. 4). При этом в начале промысла (2014 г.) увеличение доли травмированных с увеличением ширины карапакса не наблюдается. В последующие промысловые сезоны наблюдается постепенная возрастающая тенденция уменьшение доли травмированных при увеличении размеров животного.

При этом ежегодный прирост доли травмированных самцов в уловах заметно ниже у крупных самцов с ШК 130–150 мм по сравнению с мелкими особями с ШК 80–100 мм, которые при их изъятии на промысле не идут в переработку, а в живом виде возвращаются в среду обитания. Стоить отметить, что доля травмированных самцов с ШК 80–130 мм на промысле выше (в среднем на 4%), чем в уловах в ходе экосистемных съемок в одни и те же годы.

Вышеприведенный визуальный анализ, а также корреляционный анализ взаимосвязи доли травмированности и года исследований показал положительную связь. Однако связь оценивается по шкале Чеддока как слабая, но статистически значимая ($p < 0.001$). Для самцов и самок из уловов экосистемных съемок r равен 0.28 и 0.21, соответственно. Для самцов из промысловых уловов эта связь высокая и составляет 0.73 ($p < 0.001$) (табл. 5).

Таблица 4. Средняя доля (%) травмированных особей разных размерных групп (ШК) самцов краба стригуна опилио в промысловых уловах в российских водах Баренцева моря в 2014–2022 гг., оцененная по данным наблюдателей

Год/ШК	80	90	100	110	120	130	140	150	Итого
2014	28	23	22	25	28	28	27	20	26
2015	29	33	30	26	20	22	21	28	25
2016	46	43	37	36	34	35	34	26	36
2017	49	43	43	35	34	36	35	45	38
2018	61	55	49	47	45	43	45	42	48
2019	55	57	56	48	40	38	34	26	45
2020	61	61	54	46	45	42	47	29	49
2021	57	57	54	49	45	41	48	18	49
2022	54	54	55	52	48	46	48	38	51
Итого	49	48	44	38	36	36	32	25	39

Положительная слабая, но статистически значимая ($p < 0.001$), взаимосвязь была отмечена также между долей травмированных особей и средним размером особей в улове экосистемных съемок – как самцов ($r = 0.27$), так и самок ($r = 0.17$). Однако по данным наблюдателей на промысле, отмечена отрицательная умеренная ($r = –0.42$) и статистически значимая ($p < 0.001$) взаимосвязь между вышеуказанными параметрами.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции и статистическая значимость связи между долей травмированных особей в улове и факторами времени и среды

Переменная	Доля (%) травмированных		
	самцов в уловах экосистемной сьемки (n =15013)	самок в уловах экосистемной сьемки (n = 9346)	самцов в промысловых уловах (n = 90283)
Год	0.28***	0.21***	0.73***
Средняя ШК (мм) в улове	0.27***	0.17***	–0.42***
Индекс биомассы краба (т) в году t	0.19***	0.15***	0.54***
Кумулятивный годовой вылов (т) краба-стригуна с начала промысла	0.34***	0.20***	0.69***
Промысловый вылов (т) краба-стригуна опилио в полигоне в году за 3 года	0.09**	0.09**	0.55***
Промысловый вылов (т) рыб и креветки в полигоне за 3 года	0.08**	0.02*	0.24***
Суммарное время (ч) тралений в ходе донного промысла рыб и креветки в полигоне за 3 года	0.09**	0.01*	0.26***
Глубина, м	0.009*	0.02*	-0.2***

* – корреляция не значима (светло-зеленая заливка); ** – значима на уровне $p < 0.05$ (зеленая заливка); *** – значима на уровне $p < 0.001$ (темно-зеленая заливка).

Умеренная и слабая положительная корреляционная связь была отмечена между долей травмированных самцов в уловах экосистемных съемок и кумулятивным выловом стригуна в промысловые сезоны 2014–2022 гг., при этом для районов, где когда-либо проходил промысел коэффициент корреляции ($r = 0.34$) выше по сравнению с районами, где промысел отсутствовал ($r = 0.20$). Более тесная связь ($r = 0.69$) между вышеуказанными параметрами была отмечена для самцов из промысловых уловов.

Положительная корреляционная связь была отмечена между индексом биомассы краба-стригуна опилио в Баренцевом море и долей травмированных самцов ($r = 0.19$) и самок ($r = 0.15$) в уловах экосистемных съемок, а также долей травмированных самцов из промысловых уловов ($r = 0.53$).

Слабая положительная связь была отмечена для доли травмированных особей и серии промысловых параметров соответствующих полигонов: промысловый вылов краба, суммарный промысловый вылов рыб и креветки, суммарное время тралений в ходе донного промысла рыб и креветки в году t, а также суммарное время в годах t, $t-1$ и t, $t-1$, $t-2$ (см. табл. 5). При этом существенных отличий в тесноте связи при использовании промысловой статистики за различные периоды лет обнаружено не было. Анализ связи доли травмированных особей с величиной уловов различных видов гидробионтов и отдельных размерно-половых категорий краба-стригуна опилио показал отсутствие таковой как в экосистемных съемках, так и в уловах в ходе промысла при анализе всего временного ряда. Стоит отметить, что статистически значимой связи доли травмированных особей с факторами температуры, скорости и направления течений, размера частиц грунта и пр. выявлено не было, поэтому в дальнейший анализ эти параметры не включались.

Результаты моделирования взаимосвязи доли травмированности и статистически значимых факторов с использованием обобщенных (GLM) и аддитивных (GAM) моделей показали (табл. 6), что минимальные значения критериев AIC и максимальная доля объясненной дисперсии были получены для аддитивных моделей. Однако объясненная дисперсия для параметров, полученных по экосистемным съемкам, оценивалась как невысокая и не превышала 28% для самцов и 18% для самок.

Наибольшая объясненная дисперсия (72%) была получена для модели GAM, построенной на данных о травмированности крабов, полученных из промысловых уловов. При этом объяснительные переменные включали в себя кумулятивный вылов (*CC*), среднюю ширину карапакса в улове (*CW*), суммарный вылов гидробионтов в ходе донного промысла рыб и креветки за последние два года (*SCG2*, т). Более низкая объясненная дисперсия (54%) была получена для модели GLM на данных о травмированности крабов, полученных из промысловых уловов, однако она была значительно выше по сравнению с моделями, построенными на данных, полученных из научно-исследовательских уловов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Доля травмированных особей краба-стригуна опилио в уловах увеличивается с увеличением ширины карапакса, т. е. с возрастом. Это отчетливо проявляется по данным экосистемных съемок

Таблица 6. Информационные критерии и объясненная дисперсия для ряда обобщенных и аддитивных моделей взаимосвязи доли травмированных особей краба-стригуна опилио в уловах и комбинациями факторов времени и среды

Модель доли (%) травмированных:	Тип модели	Переменные*	AIC	BIC	MSE	Объясненная дисперсия, %
самцов в уловах экосистемной съемки	GLM	*Y* + *CW* + *CC* + *B* + *D* + *SCG1*	–260	–220	0.046	21.5
	GAM	*CW* + *CC* + *D* + *TD1*	–335	–245	0.042	28.1
самок в уловах экосистемной съемки	GLM	*Y* + *CW* + *B* + *D*	–243	–214	0.044	11.3
	GAM	*CC* + *CW* + *D* + *TD1*	–292	–215	0.041	18.1
самцов в промысловых уловах	GLM	*SCG2* + *D* + *CW* + *CPUE*	4932	4959	103	54.4
	GAM	*CC* + *CW* + *D* + *SCG2*	4651	4775	65	72.,1

*_ *Y* – фактор года (только для GLM), *CC* – кумулятивный вылов опилио, *CW* – средняя ширина карапакса в улове, *B* – биомасса, *D* – глубина (м), *TD1* – суммарное время (ч) тралений в ходе донного промысла рыб и креветки, *SCG1*, *SCG2* – суммарный вылов гидробионтов в ходе донного промысла рыб и креветки (т).

на всем исследовательском периоде (см. табл. 2 и 3). Такая естественная закономерность отмечалась для животных нативного ареала [14, 19, 27]. Однако в литературе встречается и обратная связь, когда травмированность уменьшается с увеличением ширины карапакса [10, 11, 40]. Кроме того, в разных районах одной акватории исследований могут встречаться разнонаправленные тенденции [10]. Такая тенденция (уменьшение доли травмированных с увеличением размеров) отмечается для баренцевоморских крабов, пойманных в промысловых уловах, т. е. крабов с ШК 80 мм и более (см. табл. 4). При этом травмируются крабы в значительной степени непромысловые (80–100 мм по ШК), которые неоднократно могут прилавливаться в ходе промысла и возвращаться в среду. Крупные промысловые крабы в большей степени идут на переработку и в меньшей возвращаются в среду по причине низких технологических качеств. Таким образом, для крупных крабов (с ШК 80–120 мм), которые облавливаются промыслом, отмечается обратная тенденция по сравнению с естественным фоновым распределением краба, находящимся вне зоны промысла.

Наиболее тесная связь была выявлена между долей травмированных особей из уловов экосистемных съемок и фактором года (*Y*), что говорит о наличии выраженного положительного тренда, связанного с ростом биомассы популяции на большом временном отрезке (2008–2019 гг.) исследовательского периода (рис. 3).

Наличие одинакового тренда в травмированности и популяционном росте очевидно связаны с увеличением плотности популяции в вышеуказанные годы. Из этого можно было бы предположить, что должна существовать тесная связь между величиной улова опилио (*MSCC*, кг на 1 кв. милю или экз. на 1 кв. милю) и долей травмированных особей в улове. Анализ доли травмированности от величины улова без учета фактора года показал, что такая связь существует, но не ярко выраженная. Для самок она очень слабая, но статистически значимая ($r = 0.08$; $p < 0.001$). Для самцов она существеннее и по шкале Чеддока определяется как слабая ($r = 0.41$; $p < 0.001$). Это может свидетельствовать о том, что самцы в более плотных поселениях склоны проявляться агрессию по отношению к друг другу в большей степени, нежели в менее плотных. При этом по отношению к самкам это закономерность практически не проявляется. Отсутствие ярко выраженной связи между плотностью распределения может объясняться высокой межгодовой вариативностью уловистости трала к бентосным организмам в ходе экосистемных съемок [3]. Вследствие этого параметр величина улова за траление в рамках всего временного ряда не может в полной мере соответствовать плотности распределения опилио на исследуемой акватории.

Синхронно с ростом популяции с 2014 г. увеличивался кумулятивный вылов краба (*CC*), т. е. усиливался антропогенный пресс на популяцию (см. рис. 3). При этом как объясняющая

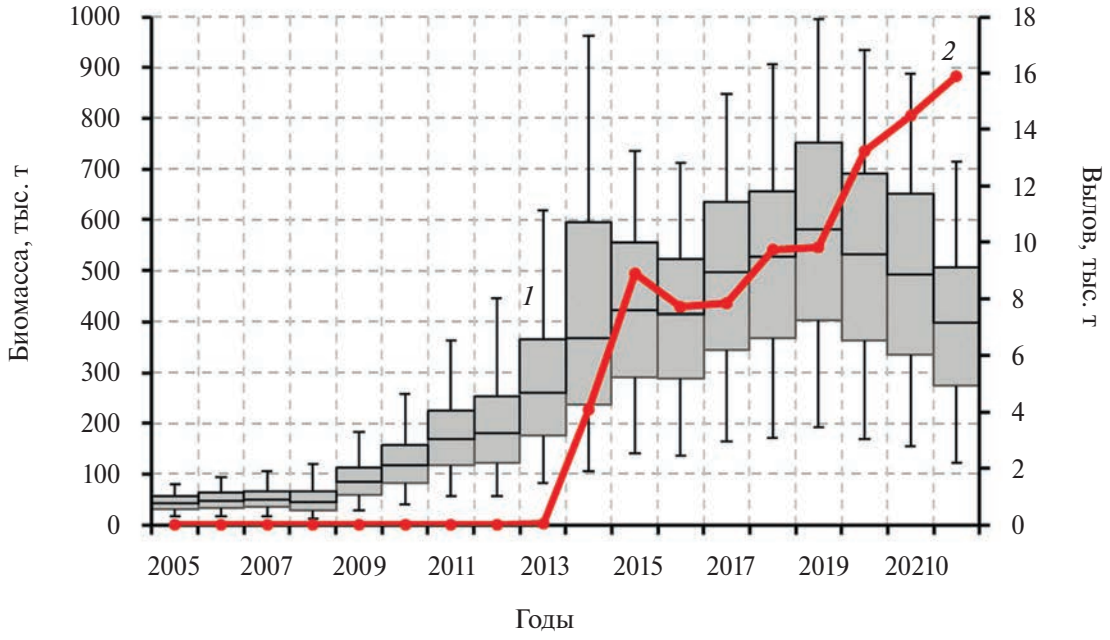

Рис. 3. Динамика биомассы промыслового запаса (*1* – диапазон квартилей с медианой; планки погрешностей – 95%-ный доверительный интервал) и вылов (*2*) краба-стригуна опилио в российской части Баренцева моря в 2005–2022 гг.

переменная, кумулятивный вылов являлся главной компонентой линейных моделей связи доли травмированных из промысловых уловов. Таким образом, в районах промысла можно предположить, что главной причиной травм краба-стригуна опилио является промысловый пресс, выражающийся в однократной и многократной поимках крупных непромысловых самцов (80–100 мм по ШК) и промысловых самцов нетоварного качества.

Оценку вклада в травматизм последствий *хэндлинга* и естественных причин можно выполнить путем сравнения крабов из районов промысла и районов, где он никогда не проводился. В период наиболее интенсивной промысловой нагрузки в 2018–2022 гг., основываясь на данных экосистемных съемок средняя доля травмированности особей из уловов, распределяющихся вне районов промысла составила 24% для всех размерных групп, и 28% для самцов 80–130 мм по ШК, тогда как в районах, где когда-либо проходил промысел – 31 и 47% соответственно. Стоит отметить, что в южных районах Баренцева моря (южнее 72°40′ с. ш.), где отсутствовал промысел и отмечаются сравнительно низкие промысловые скопления краба, доля травмированных особей всех размерных групп в эти годы составила 12%.

Кроме воздействия прямого крабового промысла, в качестве антропогенного влияния на травмированность краба-стригуна опилио было оценено воздействие тралового промысла донных рыб и северной креветки. Включение поочередно факторов *TD* и *SCG* в GLM и GAM, показало, что значимыми объяснительными компонентами эти факторы являлись для моделей связи доли травмированности краба-стригуна опилио из уловов экосистемных съемок. Однако с учетом очень низкой общей объясненной дисперсии (18–28%) влияние вышеуказанных факторов на изменение доли травмированных не превышало 3–4%. Стоит отметить, что установленная корреляция может не являться прямой причинно-следственной связью, а иметь косвенный характер. Донные хищные рыбы, чьи скопления подвергаются активной промысловой эксплуатации, в свою очередь являются источником гибели и травматизма опилио [18, 24, 25, 45–47, 53]. Известно, что стригун в Баренцевом море стал объектом питания нескольких видов рыб: трески, пикши, камбалы-ерша, звездчатого ската, северного ската, арктического шлемоносного бычка и европейского керчака [4, 39]. Значение краба в питании массовых промысловых видов, в том числе трески, в последние годы значительно возросло. Расчеты, выполненные для периода 2010–2020 гг. по стандартной методике, используемой в ПИНРО [7] показали, что ежегодное потребление крабов треской может составлять от 8 до 132 тыс. т [39, 41]. Вероятно, возросший пресс хищничества стал не только причиной возросшей естественной смертности краба-стригуна опилио, но и возросшей доли его травматизма.

Полученные нами данные позволяют сравнить показатели повреждения конечностей у краба-стригуна опилио из Баренцева моря с их величинами, отмеченными другими исследователями для опилио иных популяций. Сходные величины доли травмированных особей (50%) наблюдались в северо-западной части Берингова моря [11]. Весьма близкие значения (48%) отмечаются для популяции стригуна западной части Берингова моря, которая также подвергается эксплуатации [10]. При этом было отмечено, что для мелких особей (с ШК 70–100 мм) уровень травмированности был значительно ниже (30%) по сравнению с крупными животными (120–140 мм по ШК), у которых доля травмированных достигала 70% [19]. Высокий травматизм (до 41%) в скоплениях краба-стригуна опилио на западнокамчатском шельфе может быть связан с интенсивной эксплуатацией популяций ракообразных [27]. Сравнительно низкие средние величины (доля травмированных широкопалых самцов – 26%) были получены для Охотского моря. В то же время высокая вариативность доли травмированности (от 13 до 82%) отмечалась для различных исследовательских районов в этом регионе [14]. Таким образом, уровень травмированности краба-стригуна опилио баренцевоморской популяции в настоящее время соответствует уровню, который отмечается для эксплуатируемых популяций нативного ареала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы исследования (2016–2022 гг.) краба-стригуна опилио в Баренцевом море наблюдается тенденция к увеличенью среднегодовой доли травмированных особей в уловах как по данным экосистемных съемок, так и в промысловых уловах. Средняя доля травмированных особей в уловах научно-исследовательских съемок возросла с 5–11% в 2008–2010 гг. до 45% в 2022 г. При этом ежегодный прирост доли травмированных самцов в уловах заметно выше у крупных самцов с ШК 100–130 мм по сравнению с молодью.

Средняя доля травмированных особей крупных самцов краба стригуна опилио в промысловых уловах в 2014–2022 гг. увеличилась с 25 до

51%. При этом ежегодный прирост доли травмированных самцов в уловах заметно ниже у крупных самцов по сравнению с мелкими особями, которые на промысле не идут в переработку, а в живом виде возвращаются в среду обитания. Кроме того, доля травмированных крупных самцов на промысле статистически значимо выше (в среднем на 4%), чем в уловах в ходе экосистемных съемок в одни и те же годы.

Увеличение доли травмированности особей в период, предшествующий промысловой эксплуатации связан, по всей видимости, с увеличением плотности популяции и является следствием увеличения внутрипопуляционного взаимодействия животных. Увеличение степени травмированности в период активной промысловой эксплуатации связан главным образом с промысловым прессом на популяцию, когда в процессе обработки улова, часть особей, в том числе травмированных при поимке, возвращаются в среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабаян В.К., Булгакова Т.И., Васильев Д.А. и др.* Оценка запасов и ОДУ минтая восточной части Охотского моря с использованием данных ИС “Рыболовство” // Тр. ВНИРО. 2014. Т. 151. С. 3–17.
2. *Баканев С.В.* Расселение и оценка возможного ареала краба-стригуна (Chionoecetes opilio) в Баренцевом море // Принципы экологии. 2015. Т. 4. № 3. С. 27–39.
3. *Баканев С.В.* Перспективы промысла краба-стригуна (*Chionoecetes opilio*) в Баренцевом море // Вопр. рыболовства. 2017. Т. 18. № 3. С. 286–303.
4. *Бензик А.Н., Долгов А.В.* Краб-стригун опилио в питании трески Баренцева моря // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН. 2016. С. 47–50.
5. *Виноградов Л.Г.* Определитель креветок, раков и крабов Дальнего Востока // Изв. ТИНРО. 1950. Т. 33. С. 179–358.
6. Воздействие тралового промысла на донные экосистемы Баренцева моря и возможности снижения уровня негативных последствий. Мурманск, 2013. 55 с.
7. *Долгов А.В.* Потребление аркто-норвежской треской промысловых рыб и беспозвоночных в 1984–1993 гг. // Проблемы рыбохозяйственной науки в творчестве молодых: сб. докл. конф. молодых ученых и специалистов ПИНРО (20–21 апр. 1995 г.). ПИНРО. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 1995. С. 3–24.
8. *Залота А.К., Спиридонов В.А., Веденин А.А.* Краб-стригун (*Chionoecetes opilio*) – вид-вселенец в Карском море // Труды V международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование”. М.: МГУ, 2016. С. 326–328.
9. *Зимина О.Л.* Находка краба-стригуна *Chionoecetes opilio* (O. Fabricius, 1788) (Decapoda: Majidae) в Карском море // Биология моря. 2014. Т. 40. № 6. С. 497–499.
10. *Иванов Б.Г.* Потери ног у крабов (Crustacea, Decapoda: Brachyura Majidae, Anomura Lithodidae) в западной части Берингова моря // Исследования биологии промысловых ракообразных и водорослей морей России. М.: Изд-во ВНИРО, 2001. С. 180–205.
11. *Иванов П.Ю.* Травматизм краба-стригуна опилио и возможный учет самцов без конечностей при оценке общего промыслового запаса // Тезисы докладов 10 Всероссийской конференции по проблемам рыбопромыслового прогнозирования, Мурманск, 6–8 окт., 2009. Мурманск, 2009. С. 66–68.
12. *Иванов Б.Г., Соколов В.И.* Краб-стригун *Chionoecetes opilio* (Crustacea Decapoda Brachyura Majidae) в Охотском и Беринговом морях // Arthropoda Selecta. 1997. Т. 6. Вып. 3–4. С. 63–86.
13. Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. Выпуск 1 // Инструкции и методические рекомендации по сбору и обработке биологической информации в морях Европейского севера и Северной Атлантики. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во ВНИРО, 2004. 300 с.
14. *Карасев А.Н.* Краб-стригун опилио северной части Охотского моря (особенности биологии, запасы, промысел). Магадан: Новая полиграфия, 2014. 194 с.
15. *Кузьмин С.А., Ахтарин С.М., Менис Д.Т.* Первые нахождения краба-стригуна *Chionoecetes opilio* (Decapoda, Majidae) в Баренцевом море // Зоол. журнал. 1998. Т. 77. № 4. С. 489–491.
16. *Кулик В.В., Пранц С.В., Будянский М.В. и др.* Связь запасов черного палтуса в Охотском море с факторами внешней среды // Известия ТИНРО. 2020. Т. 200. № 1. С. 58–81.
17. *Макаров В.В.* Фауна Decapoda Берингова и Чукотского морей // Исследования дальневосточных морей СССР. М.–Л.: Изд-во АН СССР. 1941. Т. 1. С. 111–163.
18. *Орлов А.М.* Материалы по питанию белокорого палтуса *Hippoglossus stenolepis* (Pleuronectidae, Pleuronectiformes) тихоокеанских вод северных Курильских островов и юго-восточной Камчатки // Рыбохозяйственные исследования в Сахалино-Курильском районе и сопредельных акваториях Южно-Сахалинск: Сах. обл. книж. изд-во. 1999. Т. 2. С. 136–142.

19. *Селин Н.И.* Травматизм краба-стригуна *Chionoecetes opilio* из западной части Берингова моря // Биология моря. 1998. Т. 42. № 4. С. 261–265.
20. *Слизкин А.Г., Сафронов С.Г.* Промысловые крабы прикамчатских вод // Петропавловск-Камчатский: Северная Пацифика, 2000. 180 с.
21. *Соколов А.М.* Интродукция краба-стригуна опилио в Карское море. Пример дальнейшей адаптивной стратегии этого вида в российском секторе Арктики (по результатам исследований ПИНРО в 2013 г.) // Рыб. хоз-во. 2014. № 6. С. 63–68.
22. *Соколов К.М., Павлов В.А., Стрелкова Н.А. и др.* (ред.) Краб-стригун опилио *Chionoecetes opilio* в Баренцевом и Карском морях. Мурманск: ПИНРО. 2016. 242 с.
23. *Титов О.В., Ожигин В.К., Гусев Е.В., Ившин В.А.* Теория функционирования экосистемы Баренцева моря: промыслово-океанографические аспекты // Матер. отчет. сессии ПИНРО, посвященной 85-летию института. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2007. С. 176–192.
24. *Токранов А.М.* Особенности питания донных хищных рыб на западнокамчатском шельфе // Вопросы ихтиологии. 1992. Т. 32. Вып. 2. С. 119–128.
25. *Токранов А.М.* Питание липаровых рыб (Liparidae) в тихоокеанскихводах юго-восточной Камчатки и северных Курильских островов // Вопр. ихтиологии. 2000. Т. 40. № 4. С. 530–536.
26. *Трофимов А.Г.* Численное моделирование циркуляции вод в Баренцевом море. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2000. 42 с.
27. *Федотов П.А., Селин Н.И.* Травматизм крабов-стригунов *Chionoecetes bairdi* и *Ch. opilio* (Decapoda, Majidae) на шельфе восточной Камчатки // Известия ТИНРО. 2006. Т. 147. С. 103–114.
28. *Черниенко И.С.* Стандартизация производительности промысла краба-стригуна опилио западной части Берингова моря с использованием аддитивных линейных моделей // Известия ТИНРО. 2021. Т. 201. № 2. С. 359–370.
29. *Черниенко Э.П., Черниенко И.С.* Стандартизация уловов на усилие тихоокеанской скумбрии *Scomber japonicus* в прикурильских водах // Известия ТИНРО. 2022. Т. 202. № 4. С. 850–860.
30. *Acosta C.A.* The house centipede (*Scutigera coleoptrata*: Chilopoda): controversy and contradiction // Journal of the Kentucky Academy of Science. 2003. V. 64. P. 1–5.
31. *Apones P., Brown C.A.* Between-sex variation in running speed and a potential costof leg autotomy in the wolf spider Pirata sedentarius II American Midland Naturalist. 2005. V. 154. P. 115–125.
32. *Armstrong D.A., Wainwright T.C., Jensen G.C. et al.* Taking refuge from bycatch issues: red king crab (*Paralithodes camtschaticus*) and trawl fisheries in the Eastern Bering Sea // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1993. V. 50. P. 1993–2000.
33. *Bateman P.W., Fleming P.A.* To cut a long tail short: a review of lizard caudal autotomy studies carried out over the last 20 years // Journal of Zoology. 2009. V. 277. P. 1–14.
34. *Bliss D.E.* Autotomy and regeneration // The physiology of Crustacea / ed. by T.H. Waterman. New York: Academic Press, 1960. P. 561–589.
35. *Burnham K.P., Anderson D.R.* Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. 2nd ed. N.Y.: Springer, 2002. 488 p.
36. *Dutil J.-D., Munro J., Peloquin M.* Laboratory study of the influence of prey size on vulnerability to cannibalism in snow crab (*Chionoecetes opilio* O. Fabricius. 1788) // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 1997. V. 212. P. 81–94.
37. *Gjøsæter H., Prozorkevich D.V. et al.* From single species surveys towards monitoring of the Barents Sea ecosystem // Progress in Oceanography. 2018. V. 166. P. 4–14.
38. *Fleming P.A., Muller D., Bateman P.W.* Leave it all behind: a taxonomic perspective of autotomy in invertebrates // Biological Reviews. 2007. V. 82. P. 481–510.
39. *Holt R.E., Hvingel C., Agnal A. et al.* Snow crab (*Chionoecetes opilio*), a new food item for North-east Arctic cod (*Gadus morhua*) in the Barents Sea // ICES Journal of Marine Science. 2021. V. 78. Iss. 2. P. 491–501.
40. *Humborstad O.B., Eliassen L.K., Siikavuopio S.I. et al.* Catches in abandoned snow crab (Chionoecetes opilio) pots in the Barents Sea // Marine Pollution Bulletin. 2021. V. 173. Part A. Art. 113001. 7 p.
41. ICES. Arctic Fisheries Working Group (AFWG) // ICES Scientific Reports. 2021. V. 3:58. 817 pp.
42. *Ivanov B.G.* Limb injuries in crab in the Bering Sea (Crustacea, Decapoda: Brachyura, Majidae; Anomura Lithodidae) // Arthropoda Selecta. 1994. V. 3. No. 3–4. P. 33–56.
43. *Jadamec L.S., Donaldson W.E., Cullenberg P.* Biological Field Techniques for *Chionoecetes* Crab. Published by University of Alaska Sea Grant College Program, Fairbanks. 1999. AK-SG-99-02. 80 p.
44. *Jewett S.C.* Predation on crabs of the genus *Chionoecetes:* a literature review // In: Proc. Int. Symp. genus *Chionoecetes.* Lowell Wakefield Fish. Symp. Ser., Alaska Sea Grant Rep. 82–10. University of Alaska, Fairbanks, Alaska. 1982. P. 521–538.
45. *Jewett S.C., Powell G.C.* Summer food of the sculpins, *Myoxocephalus spp.* and *Hemilepi- dotus jordani*, near Kodiak Island, Alaska // Mar. Sci. Commun. 1979. V. 5. No. 4–5. P. 315–331.
46. *Lilly G.R.* Interannual variability in predation by cod (*Gadus morhua*) on capelin (*Mallotus villosus*) and other prey off southern Labrador and northeastern Newfoundland // ICES Mar. Sci. Symp. 1991. V. 193. P. 133–146.
47. *Livingston P.A.* Interannual trends in Pacific cod, *Gadus macrocephalus*, predation on three commercially important crab species in the eastern Bering Sea // Fish. Bull. 1989. V. 87. № 4. P. 807–827.

48. *Lovrich G.A., Sainte-Marie B.* Cannibalism in the snow crab, *Chionoecetes opilio* (O. Fabricius) (Brachyura: Majidae), and its potential importance to recruitment // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 1997. V. 211. P. 225–245.
49. *Mariappan P., Balasundaram Ch., Schmitz B.* Decapod crustacean chelipeds: an overview // Journal of Biosciences. 2000. V. 25. P. 301–301.
50. *McVean A.* Autotomy // Comparative Biochemistry and Physiology. 1975. V. A51. P. 497–505.
51. *Prena J., Schwinghamer P., Rowell T.W. et al.* Experimental otter trawling on a sandy bottom ecosystem of the Grand Banks of Newfoundland: analysis of trawl bycatch and effects on epifauna // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1999. V. 181. P. 107–24.
52. *Rathbun M.J.* The spider crabs of America // Bulll. U.S. Nat. Mus. 1925. V. 129. 613 p.
53. *Robichaud D.A., Elner R.W., Bailey R.F.J.* Differential selection of crab *Chionoecetesopilio* and *Hyas spp.* as prey by sympatric cod *Gadus morhua* and thorny skate *Raja radiata* // Fish. Bull. 1991. № 89. P. 669–680.
54. *Robinson J.V., Shaffer L.R., Hagemeier D.D., Smatresk N.J.* The ecological role of lamellae loss in the larval damselfly, Ischnura posita (Hagen) (Odonata: Zygoptera) // Oecologia. 1991. V. 87. P. 1–7.
55. *Stesko A.V., Bakanev S.V.* Bycatches of the red king crab in the bottom fish fishery in the Russian waters of the Barents Sea: assessment and regulations // ICES Journal of Marine Science. 2021. V. 78. Iss. 2. P. 575–583.
56. *Wood F.D., Wood H.E.* Autotomy in decapods crustacean // The Journal of Experimental Zoology. 1932. V. 65. P. 1–55.

INJURIES AS AN INDICATOR OF THE POPULATION DENSITY AND FISHING INTENSITY OF SNOW CRAB (*CHIONOECETIS OPILIO*) IN THE BARENTS SEA

S. V. Bakanev*

Polar Branch of "VNIRO" ("PINRO" named after N.M. Knipovich), Murmansk, Russia
**e-mail: bakanev@pinro.ru*

This paper analyses the dynamics of snow crab injuries in catches that were taken during the surveys from 2008 to 2022, as well as the data collected by observers in the fishery for this species in the Russian part of the Barents Sea between 2014 and 2022. The average portion of injured crabs in catches taken during research surveys increased from 5–11% in 2008–2010 to 45% in 2022. Moreover, the annual increase in the number of injured males in catches is much higher for large crabs with a carapace width of 100–130 mm than for juveniles. Using generalized and additive models, the simulation data on relations between the portion of injuries and statistically relevant natural and anthropogenic factors showed that the increased population density causes a high number of injured individuals before the fishery is commenced. This is a result of the active intrapopulation interaction between crabs. When the commercial fishery is actively conducted, a high portion of injuries is predominantly caused by the fishing pressure on the population, when some individuals, including injured crabs, are returned to their habitat after being captured and processed.

Keywords: snow crab, the Barents Sea, limb injury, population density, fishing intensity

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 629–641

МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ

УДК 595.384.2-116(268.45+268.52)

ФОРМИРОВАНИЕ РЕПРОДУКТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА КАМЧАТСКОГО КРАБА В ПРОЦЕССЕ ЕГО АККЛИМАТИЗАЦИИ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

© 2024 г. С. В. Баканев *, Т. В. Шамрай

Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии ("ПИНРО" им. Н.М. Книповича), Мурманск, Россия

**e-mail: bakanev@pinro.vniro.ru*

Поступила в редакцию 04.10.2023 г.
После доработки 05.12.2023 г.
Принята к публикации 28.12.2023 г.

Представлен сравнительный анализ размерной структуры, размеров 50%-го созревания и плодовитости камчатского краба Баренцева моря в период его расселения и акклиматизации и в современный период интенсивного промысла. Кроме того, на основе литературных данных проведена оценка различий вышеуказанных параметров баренцевоморских особей и особей из нативного ареала краба. В 2019–2022 гг. у камчатского краба в Баренцевом море наблюдается тенденция к снижению его репродуктивного потенциала в сравнении с периодом активной акклиматизации (1995–2003 гг.), который предшествовал промысловой эксплуатации. Изменения в репродуктивных параметрах баренцевоморской популяции камчатского краба в последние годы увеличивают сходство этих характеристик с таковыми у нативных популяций тихоокеанского региона, активная эксплуатация которых началась в начале XX в.

Ключевые слова: камчатский краб, Баренцево море, половозрелость самок, плодовитость, акклиматизация

DOI: 10.31857/S0030157424040072, **EDN:** PRNTZN

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг и оценка состояния сложно организованных и плохо наблюдаемых объектов, таких как, например, морские экосистемы или популяции гидробионтов, связаны с определенными трудностями [12]. Например, изучение популяционной динамики и в рамках нее определение репродуктивного потенциала сопряжено со сложностью определения точной численности гидробионта в силу обширной пространственно-временной изменчивости объекта исследований, невозможности прямой оценки естественной смертности и параметров процессов размножения, а также определения природной емкости среды. Оценка вышеуказанных параметров, отражающих состояние популяции, требует не только данных прямого учета инструментальными методами в ходе многолетнего мониторинга, но и применения методов математического моделирования. Однако некоторые биологические показатели, в том числе оценивающие репродуктивные характеристики популяции, возможно относительно легко оценить посредством прямого полевого анализа, например, из уловов научно-исследовательских съемок или промысла. Одними из таких критериев, отражающих изменение репродуктивного потенциала популяций морских гидробионтов, могут служить данные по размерному составу, скорости полового созревания и плодовитости.

Индивидуальная плодовитость, как параметр, имеющий возможность наиболее точного определения, является одним из важнейших количественных показателей, характеризующим успешность воспроизводства гидробионта, а в случае с акклиматизированным камчатским крабом в Баренцевом море является показателем уровня адаптации популяции к условиям новой среды обитания.

Оценки плодовитости и других репродуктивных параметров баренцевоморской популяции камчатского краба были выполнены в ходе первых специализированных экспедиций российских и норвежских исследователей в 1993–2000 гг. [4, 5, 18, 21, 22, 23]. Было установлено, что по ряду репродуктивных параметров (максимальные размеры, максимальная индивидуальная абсолютная плодовитость (ИАП), размер

50%-го созревания) самки камчатского краба Баренцева моря несколько превосходят самок тихоокеанского региона [2, 4, 11]. Высокие значения ИАП самок камчатского краба в Баренцевом море были обусловлены двумя причинами: крупными размерами, по которым они, как правило, превосходили самок тихоокеанских популяций, а также бóльшим объемом кладки у самок одних и тех же размеров.

С открытием коммерческого лова и одновременно интенсификацией браконьерского промысла камчатского краба в Баренцевом море некоторые исследователи начали отмечать признаки снижения ряда репродуктивных параметров в начале 2000-х гг. [13, 20]. Кроме того, с 2008 г. в норвежских водах при промысле камчатского краба кроме самцов промыслового размера (с длиной карапакса свыше 135 мм) стало допускаться изъятие самок с длиной карапакса 137 мм [20]. Схожие тенденции в снижении репродуктивного потенциала при интенсификации промысла ранее отмечались в нативных ареалах как камчатского краба, так и других промысловых беспозвоночных. Например, некоторые авторы указывают, что популяционная плодовитость может снизиться из-за уменьшения численности производителей, но также может быть следствием изменения соотношения самок и самцов [27]. Достаточно часто отмечается, что промысел многих ценных ракообразных меняет демографическую структуру их популяции, поскольку вылавливаются только крупные самцы [45]. Такие изменения характерны для популяций камчатского краба в тихоокеанском регионе, когда репродуктивный успех краба зависит от одновременного нахождения на местах спаривания самцов и самок [37, 46]. Размер самца является важным фактором эффективности спаривания из-за иерархии доминирования, которую демонстрируют более крупные самцы во время спаривания [35]. Крупные самки, производящие наибольшее количество икры, более успешно оплодотворяются крупными самцами [25, 41]. Самки, спаривающиеся с мелкими самцами с меньшим объемом сперматофор, имеют меньший успех оплодотворения, чем самки, спаривающиеся с более крупными самцами [33–35, 40]. В некоторых работах отмечается, что в уловах в районах, наиболее подверженных промысловому воздействию, наблюдались крупные самки без кладки или с уменьшенными размерами кладки [39], что может быть связано с неудачным спариванием с более мелкими самцами. Таким образом, делается вывод о том, что промысел, основанный на изъятии крупных самцов, может косвенно, но в значительной мере влиять на популяционную плодовитость, тем самым снижая репродуктивный потенциал популяции в целом. При этом ежегодный мониторинг динамики репродуктивных параметров эксплуатируемых популяций и своевременное принятие управленческих решений в рамках стратегии регулирования промысла при негативных изменениях этих параметров позволит обеспечить рациональную эксплуатацию биологических ресурсов.

В настоящей работе впервые выполнен сравнительный анализ размерной структуры, размеров 50%-го созревания и плодовитости камчатского краба Баренцева моря в период его расселения и акклиматизации, предшествующий его промысловой эксплуатации, и в современный период его изучения и интенсивного промысла. Кроме того, на основе литературных данных проведена оценка различий вышеуказанных параметров баренцевоморских особей с аналогичными характеристиками, полученными для его нативного ареала.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В работе использованы данные Полярного филиала ФГБНУ “ВНИРО” по уловам самок камчатского краба в Баренцевом море, полученные в ходе специализированных траловых и ловушечных съемок, а также данные наблюдателей в ходе промысла этого вида в российской части Баренцева моря в 1995–2022 гг. Сбор проб на плодовитость выполнялся в начальный период исследований интродуцированного краба (1995–2003 гг.), когда происходила его активная акклиматизация, и в последние годы на фоне относительной стабилизации пространственной структуры популяции камчатского краба в Баренцевом море (2019–2022 гг.). При пространственном анализе репродуктивных параметров камчатского краба обследованная акватория была разделена, с учетом истории его акклиматизации, на три района: Западный (Варангер-фьорд, северо-запад Рыбачьей банки), Центральный (Мотовский залив, Рыбачья и Кильдинская банки, Западный Прибрежный район) и Восточный (Восточный Прибрежный район, Мурманское мелководье, Канинская банка) (рис. 1).

Сбор и обработку биологического материала выполняли в соответствии с методиками, принятыми в Полярном филиале ФГБНУ “ВНИРО” [7]. Биологический анализ самок камчатского краба включал в себя промеры ширины (ШК) и длины карапакса, взвешивание, определение стадии

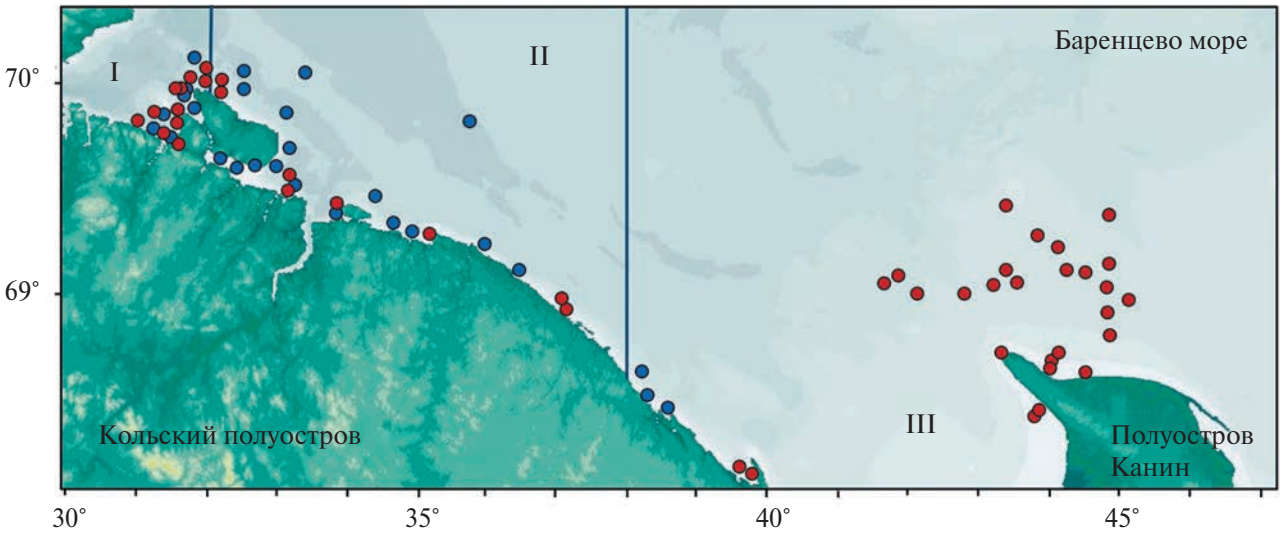

Рис. 1. Места отбора проб камчатского краба на плодовитость в Баренцевом море в 1995–2003 гг. (синие точки) и 2019–2022 гг. (красные точки): I – Западный; II – Центральный; III – Восточный районы.

зрелости икры, межлиночной категории, состояния конечностей и наличие обрастаний. Под половой зрелостью самок понималась функциональная половозрелость, которая определялась по наличию наружной икры под абдоменом. При отборе проб на плодовитость кладку икры вместе с плеоподами помещали в отдельную емкость и фиксировали 4% раствором формальдегида. Всего за время исследования подверглось биологическому анализу 37 тыс. особей и было отобрано 763 пробы на плодовитость (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика первичного материала по камчатскому крабу, собранного в 1995–2022 гг. в Баренцевом море

Период/ Районы	Кол-во биологических анализов	Кол-во проб на плодовитость
1995–2003 гг.		
Западный	1299	151
Центральный	4979	206
Восточный	11236	14
2004–2018 гг.		
Западный	508	–
Центральный	2117	–
Восточный	10840	–
2019–2022 гг.		
Западный	1299	134
Центральный	4979	55
Восточный	11236	203
Всего	36883	763

При оценке плодовитости кладку икры отделяли от плеопод и обсушивали на фильтровальной бумаге до постоянной массы. Кладку взвешивали, просчитывали количество икры в двух навесках по 500 мг. Определяли вес одной икринки и общее количество икры в кладке, т. е. абсолютную индивидуальную плодовитость (ИАП) по соотношению веса кладки и среднего веса икринки. Относительную индивидуальную плодовитость (ИОП) определяли как отношение абсолютной плодовитости к массе тела самки без учета массы икры.

Для оценки скорости полового созревания логистические кривые (огивы половозрелости) были построены методом взвешенной нелинейной регрессии [30] с использованием GLM-функции с биноминальным распределением (family = binominal) в статистической среде R [43]. Поскольку объясняющая переменная (наличие наружной икры) выражается бинарным значением (1 – самка с икрой и 0 – самка без икры), можно оценить, при какой ШК краб имеет 50%-ю вероятность нести икру. Эта оценка была произведена с использованием команды “dose.p” пакета “Mass” [44]. Значимость наблюдаемых различий оценивалась по критерию Стьюдента.

Для оценки зависимости плодовитости, веса кладки и среднего веса икринки от ШК использовалась линейная регрессия, с помощью которой определялись статистическая значимость и величина прироста указанных переменных с увеличением ШК. Ковариационный анализ (ANCOVA) построенных зависимостей был выполнен для определения статистической значимости изменчивости данных переменных [49], а также в целях

оценки различий в приросте ИАП по отношению к ШК (наклона регрессионных линий), полученных для самок камчатского краба, пойманных в разные годы и в разных районах.

Обработка данных выполнялась в Microsoft Office Excel [26], а статистический анализ и создание рисунков выполнялось в приложении R с помощью библиотек “ggplot2” [47] и “ggridges” [48].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ временного ряда показал весьма существенные различия в частотно-размерных характеристиках уловов самок камчатского краба в Баренцевом море в 1995–2022 гг. (рис. 2). Отсутствие молоди (ШК <80 мм) в размерных рядах самок без икры обусловлено селективностью лова и особенностями распределения особей, которые, концентрируясь в узкой прибрежной полосе, были недоступны для облова в ходе исследовательских съемок. Одномодальное распределение размерного ряда неполовозрелых самок было характерно для большинства лет, при этом медиана варьировала в основном от 110 до 120 мм по ШК, а мода – 100–130 мм по ШК. Минимальная медиана была отмечена в 1998–2000 гг. (96–100 мм), когда впервые было зарегистрировано высокоурожайное поколение в новых для камчатского краба восточных районах его баренцеворского ареала. В отдельные годы (1999, 2004, 2005, 2014, 2016) размерно-частотное распределение самок без икры носило четкий двухмодальный характер, что скорее всего свидетельствовало о появлении в уловах исследовательских съемок двух последовательных высокоурожайных поколений неполовозрелых самок.

Частота появления урожайных поколений, по всей видимости, является также основной причиной, влияющей на характер размерно-частотного распределения самок с икрой. При этом на протяжении всего временного ряда в уловах были отмечены самки с одно-, двух- и полимодальными ассиметричными размерными группами. При этом в начальный период исследования в 1995–2011 гг. размеры модальных групп были весьма вариативны. Например, с 2001 по 2009 г. в размерном составе самок с икрой хорошо прослеживается урожайное поколение с последовательно возрастающими размерами модальной группы. В 2001–2003 гг. это поколение постепенно пополняет нерестовую часть популяции, имея при этом размеры 100–140 мм по ШК. В 2007–2009 гг. поколение достигает максимальных размеров 150–180 мм и постепенно элиминируется. С 2012 г. модальные размеры, доминирующие в уловах, имеют сходные значения. При этом мода основной группы незначительно повышается с 2012 по 2016 г., а затем снижается с 2017 по 2022 г.

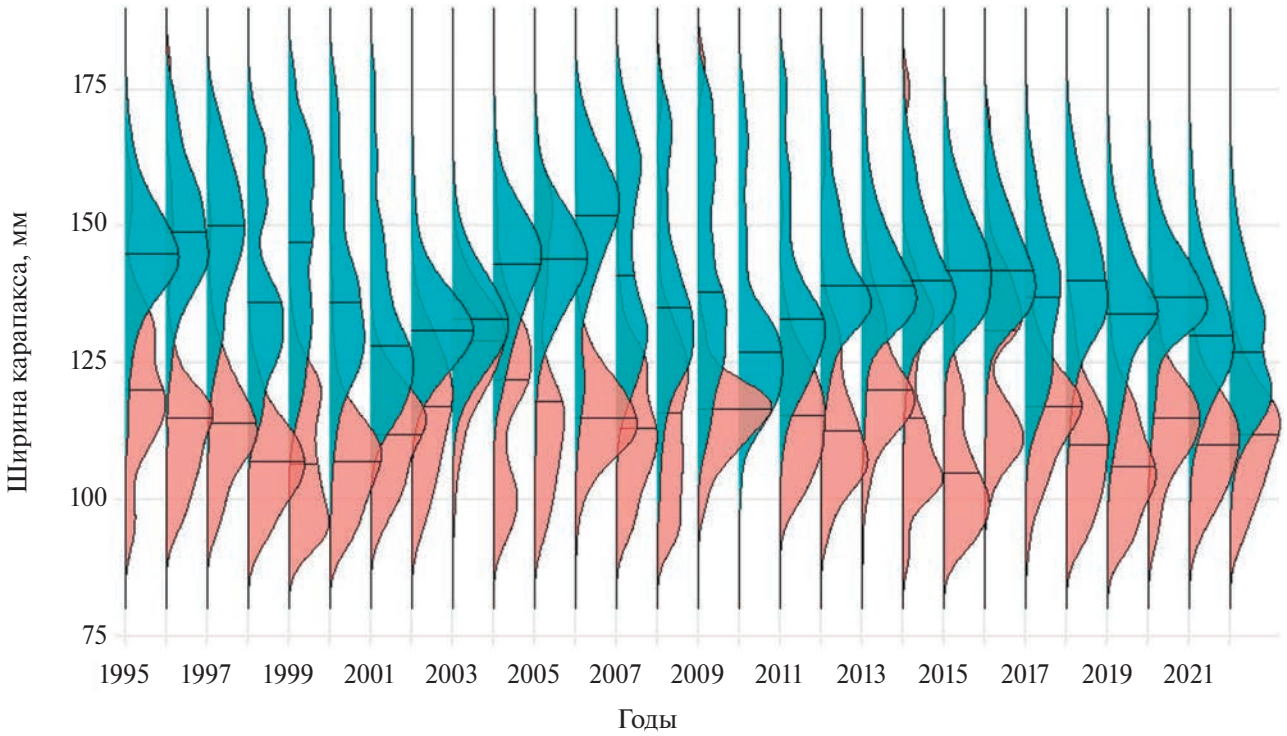

Рис. 2. Размерный состав уловов неполовозрелых (красная область) и половозрелых (бирюзовая область) самок камчатского краба в Баренцевом море по данным 1995–2022 гг. (черная линия – медиана).

Характер размерно-частотного распределения половозрелых самок камчатского краба обусловлен не только появлением урожайных поколений, но и поэтапным его расселением с запада на восток в ходе его акклиматизации и формированием современного ареала в начальный период исследований. Это подтверждается сравнительным анализом размерного состава самок с икрой отдельно по районам и годам, с помощью кривых скользящих регрессий (loess), которые лучше всего согласовываются с исходными данными по размерным рядам (рис. 3).

Плавные кривые регрессий размерных рядов с весьма сходной динамикой характерны для размерных рядов самок с икрой из уловов Западного и Центрального районов. При этом размерный диапазон варьирования кривых имеет весьма узкий диапазон (130–150 мм по ШК) на всем временном ряду исследования. Низкая межгодовая изменчивость модальных размеров половозрелых самок обусловлена сравнительно ранней (до периода начала специализированных исследований) акклиматизацией камчатского краба в этих районах. Заселение камчатским крабом Восточного района происходило позднее, что уже подтверждается данными регулярного мониторинга. Впервые формирование нерестового стада в этом регионе происходило с 1999 г., когда в уловах начали встречаться самки с икрой с минимальными модальными размерами 105–115 мм ШК, урожайное поколение которых можно отнести к 1991 г. К 2008 г. половозрелые самки этого поколения достигли максимальных модальных размеров 145–155 мм по ШК. С 2009 г. модальные размеры самок с икрой из Восточного района постепенно начали снижаться, а с 2014 г. кривые регрессий размерных рядов половозрелых самок из уловов всех трех районов практически совпадают, имея незначительный негативный тренд. Таким образом, характер изменения размерного состава половозрелых самок из уловов Восточного района с 1999 г. обусловил общую тенденцию в изменчивости размерно-частотного распределения самок баренцевоморской популяции камчатского краба, представленного на рис. 2.

Стоит отметить, что в 1995, 2009, 2014 гг. отмечалось присутствие крупных самок (с ШК свыше 160 мм) с отсутствием наружной икры. Увеличение доли самок без икры среди крупных особей, т. н. яловость, может свидетельствовать об уменьшении репродуктивного потенциала популяции по каким-либо причинам. Мониторинг этого показателя является простым, и, одновременно, важнейшем критерием, отражающим состояние как эксплуатируемых популяций в целом, так и интродуцируемого камчатского краба в частности. Временной анализ межгодовой изменчивости доли яловых самок среди крупных самок

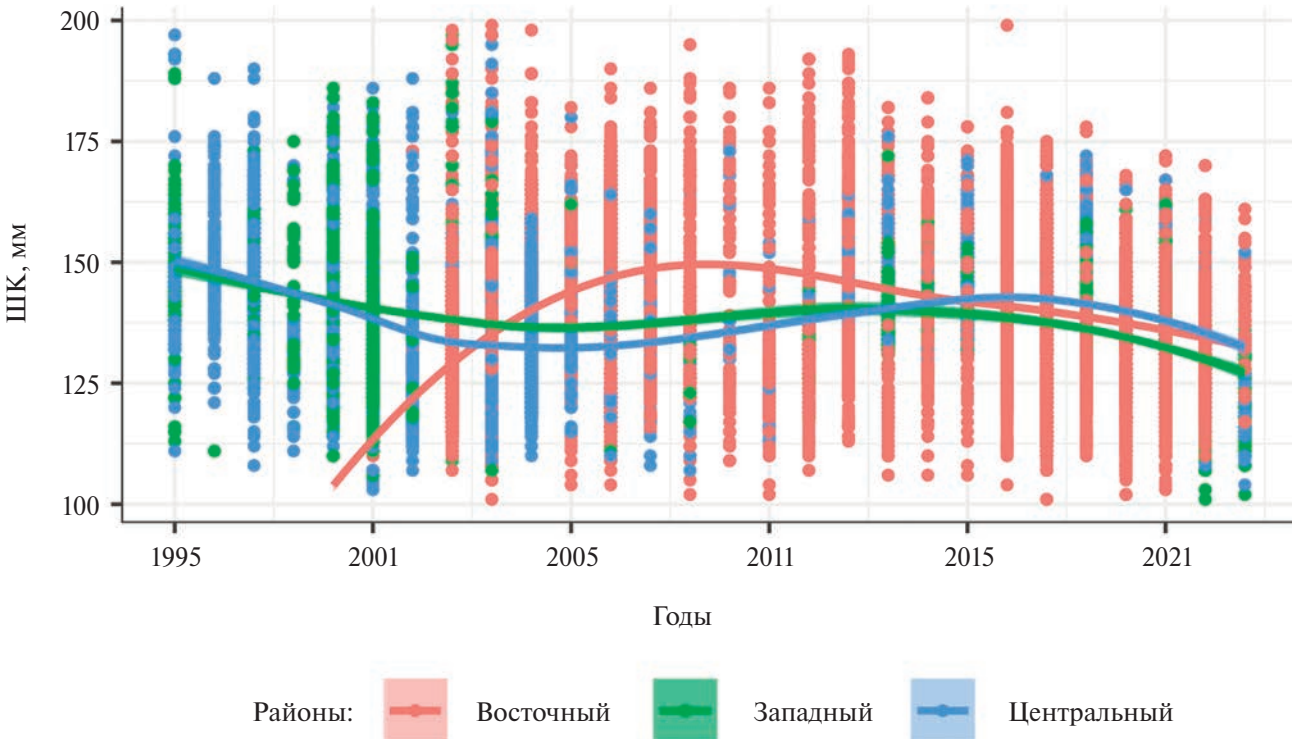

Рис. 3. Кривые скользящих регрессий (loess-функция) размерных рядов половозрелых самок камчатского краба в уловах в разных районах Баренцева моря в 1995–2022 гг.

(с ШК более 100 мм) не показал ярко выраженных тенденций. Ежегодная доля этих крабов в уловах изменялась в пределах от 0.0 до 10.6% со среднемноголетним значением 5.6%. Причины появления экстремальных значений скорее связаны не с биологическими причинами, а статистическими, так как были получены на выборках менее 100 экз. при среднемноголетнем показателе промера 773 особей в год. Анализ по укрупненным периодам показал, что доля яловых самок в начальный период исследований, когда отсутствовал коммерческий промысел камчатского краба в Баренцевом море, была выше (8.9%) по сравнению с последующими периодами 2004–2018 и 2019–2022 гг.: 3.1 и 3.4% соответственно.

Межгодовой сравнительный анализ скорости созревания самок камчатского краба в Баренцевом море показал, что 50% особей созревали при ШК равной 111.5–124.5 мм за весь период исследований. Анализ по укрупненным периодам показал, что размер 50%-го созревания самок в начальный период исследований был статистически значимо ниже (116.1 мм по ШК) по сравнению с последующими периодами 2004–2018 и 2019–2022 гг.: 119.0 и 121.1 мм по ШК, соответственно. Несущественные, но статистически значимые отличия в скорости созревания были получены в различных районах Баренцева моря: Западный – 120.0 мм, Центральный – 117.8 мм, Восточный – 118.7 мм по ШК (рис. 4).

Пространственно-временной анализ зависимости плодовитости от размеров самки показал различия в величине прироста плодовитости с увеличением размеров особи как в разные периоды исследования, так и по районам (рис. 5, 1А и 1Б). Так, прирост количества икры с приростом ШК у самок в начальный период исследования (1995–2003) и в последние годы (2019–2022) линеен и статистически различен (ANCOVA, $p < 0.001$): 50 и 25 тыс. икринок при увеличении ШК на 10 мм соответственно. Статистическая значимость различий была также подтверждена для связи между ШК самок и их плодовитостью в разных районах ареала. Максимальный прирост количества икры при увеличении ШК на 10 мм был получен для самок камчатского краба Центрального района (60 тыс. икринок), а минимальный (25 тыс. икринок) для крабов Восточного района.

Тесная корреляция между плодовитостью и ШК в значительной степени обусловлена объемом кладки, размер которой растет с увеличением ШК (рис. 5, 2А и 2Б), нежели весом икринок, который статистически значимо ($p < 0.001$) отличался в начальный период исследований и последние годы, но взаимосвязь с ШК обнаружена не была (рис. 5, 3А). В тоже время отмечался незначительный, но статистически значимый ($p = 0.048$) прирост веса икринки с увеличением ШК при анализе уловов Западного и Центрального района (рис. 5, 3Б).

Индивидуальная относительная плодовитость (ИОП) в ранний период исследований (1995–2003) была значимо выше значений позднего периода (2019–2022). Кроме того, максимальные значения ИОП, ИАП, веса кладки и икринки были получены для Центрального района, а минимальные – для Восточного (рис. 6).

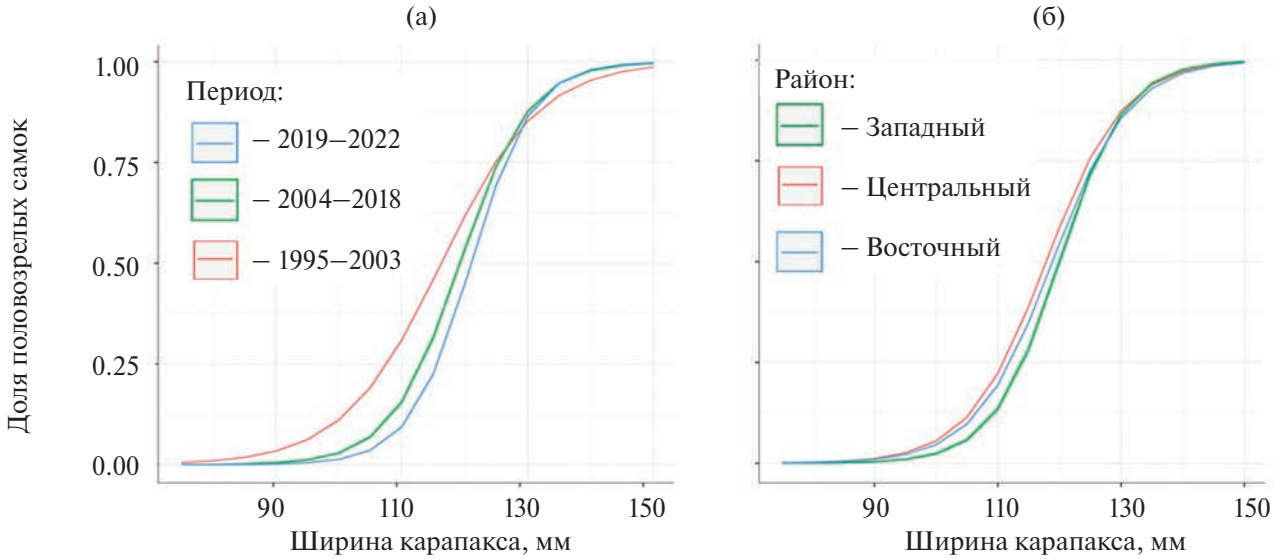

Рис. 4. Зависимость доли самок с икрой от размеров их карапакса в уловах в разные периоды (а) и разных районах исследований (б) в 1995–2022 гг. в Баренцевом море.

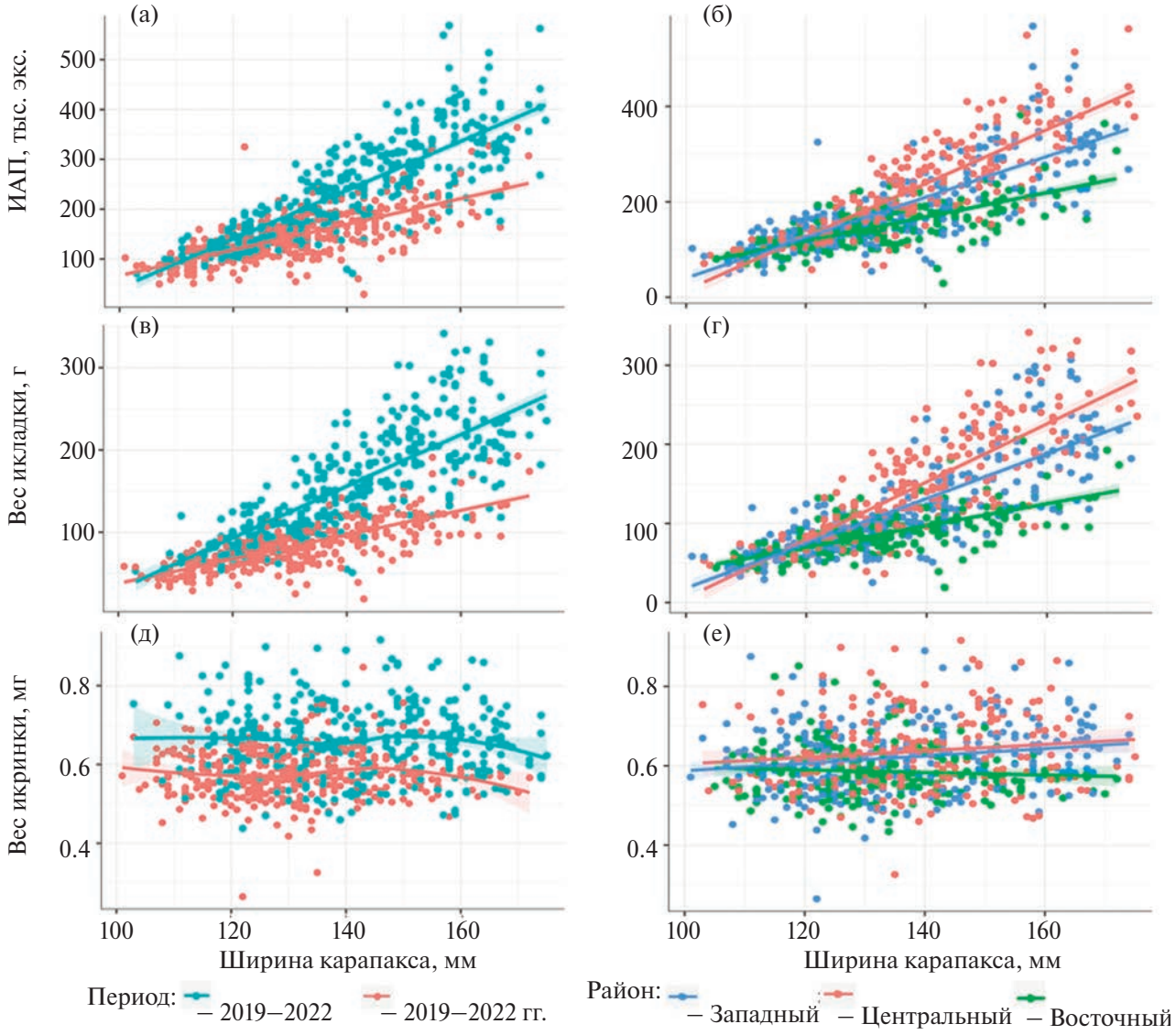

Рис. 5. Связь между шириной карапакса самок камчатского краба и их плодовитостью (ИАП) (1), весом кладки (2) и весом икринки (3) в разные периоды (А) и разных районах исследований (Б) в Баренцевом море по данным 1995–2003 и 2019–2022 гг.

Корреляционная связь между ИОП и ШК достоверно отсутствовала при анализе двух временных отрезков, поэтому для визуализации использовались кривые скользящих регрессий (loess-функция) (рис. 6а). В то же время при анализе взаимосвязи ИОП с ШК по разным районам отмечалась значимая линейная связь (ANCOVA, $p < 0.001$; рис. 6б).

С ростом размеров самок возрастала ИОП, достигая максимальных значений при ШК 150 мм в 1995–2003 гг. Однако в последние годы исследований (2019–2022) таких тенденций обнаружено не было, а ИОП имела два слабовыраженных пика при ШК 125 и 170 мм по ШК (рис. 6а). Статистически значимые отличия в трендах связи ИОП и ШК были обнаружены по Центральному и Западному районам, в то же время отсутствие тренда связи ШК с ИОП, а также минимальные показатели ИОП были характерны для уловов в Восточном районе, где акклиматизация камчатского краба происходила позднее, по сравнению с западными районами, а его эксплуатация интенсивнее.

ОБСУЖДЕНИЕ

В период начала мониторинга формирования популяции (1995–2003 гг.) по ряду репродуктивных параметров (максимальные размеры, размер 50%-ного созревания, максимальная абсолютная индивидуальная плодовитость) самки камчатского краба Баренцева моря как в российских, так

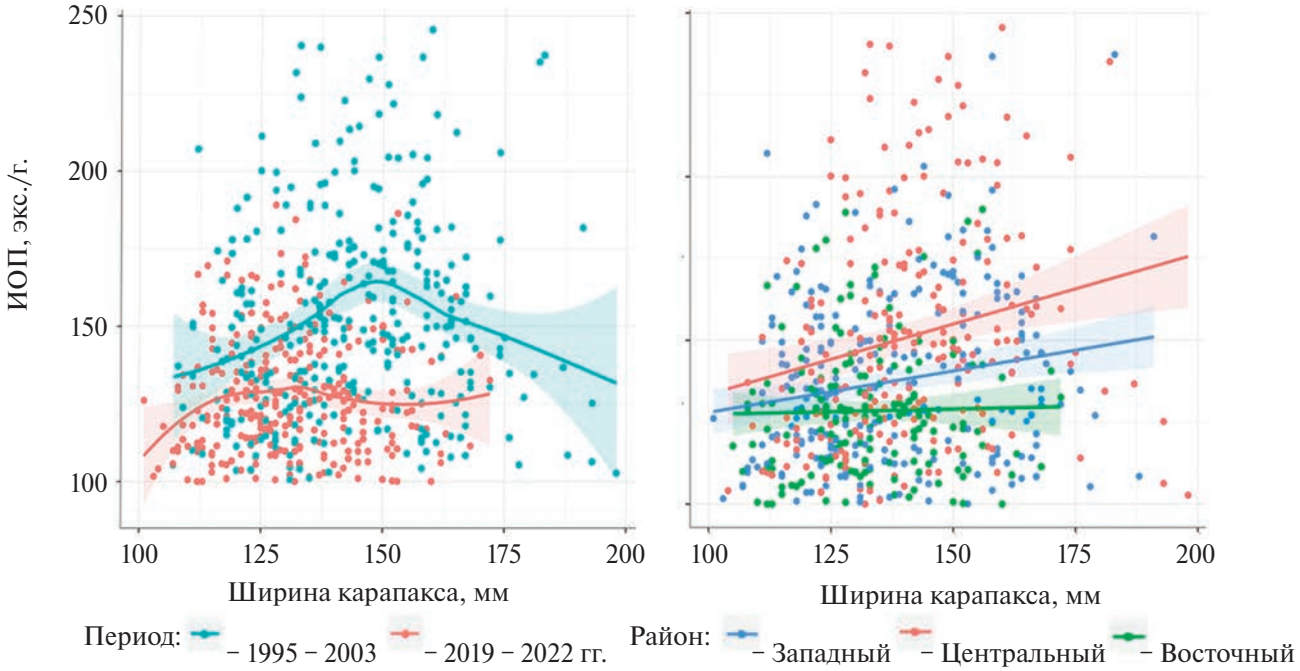

Рис. 6. Связь между шириной карапакса самок камчатского краба и их индивидуальной относительной плодовитостью (ИОП, экз/г.) в разные периоды (*А*) и разных районах исследований (*Б*) в Баренцевом море по данным 1995–2022 гг.

и норвежских водах превосходили самок нативного тихоокеанского региона [2, 3, 19, 20]. Максимальные размеры самок с икрой в начальный период исследований нередко превышали 200 мм по ШК, достигая в отдельные годы рекордных 220 мм [4], в то время как в нативном ареале самки таких размеров практически не встречались [10, 17, 31]. Средний размер 50%-ного созревания (118–132 мм по ШК) [4] в начале исследований существенно превышал аналогичный параметр для популяций тихоокеанского региона (73–112 мм по ШК) [10, 17, 31]. Рекордные значения абсолютной плодовитости (до 704 тыс. икринок) были отмечены для баренцевоморских самок в этот же период исследований, что значительно превышало максимальные значения этого параметра для самок дальневосточного региона (214–564 тыс. экз.) [9, 10, 25, 35, 40]. Существенные различия ИАП обнаруживались для самок с икрой с наиболее многочисленными модальными размерами, характерными для Баренцева моря 130–140 мм по ШК. В 1995–2003 гг. ИАП баренцевоморских самок указанных размеров в среднем изменялась в пределах 178–235 тыс. экз., в то время как в тихоокеанском регионе ИАП, рассчитанная на основе коэффициентов регрессионной взаимосвязи с ШК, варьировала в пределах 97–230 тыс. экз. [9, 10, 17, 25, 31, 35].

В последние годы исследований (2019–2022 гг.) вышеуказанные репродуктивные параметры половозрелых самок баренцевоморской популяции статистически значимо изменились. Максимальные размеры самок с икрой снизились в среднем со 197 мм по ШК в 1995–2003 гг. до 175 мм по ШК в 2019–2022 гг. При этом средний размер 50%-го созревания увеличился со 116 мм по ШК до 121 мм по ШК в эти периоды. Значительно ниже стали вес кладки (на 39%) и ИАП (на 30%) для самок одних и тех же размеров (см. рис. 5, 1А; рис. 5, 1Б), при этом вес икринки также снизился, но менее существенно, в среднем на 12% (с 0.66 до 0.58 мг). Стоит отметить, что отрицательные тренды аналогичных показателей во временных рядах были отмечены для самок баренцевоморский популяции, обитающих в норвежских фьордах, которые были описаны в обобщающей магистерской работе Haakon Winge Hjertaas в 2023 [19]. При этом негативные тенденции отмечались для самок, выловленных в разных фьордах, с некоторым запаздыванием с востока на запад, т. е. по мере расселения камчатского краба в норвежских водах. Предполагаемыми причинами таких явлений стали процессы, связанные как с акклиматизацией (увеличение плотности акклиматизанта и, вследствие этого, ухудшение его трофической базы и увеличение риска инфекционных заболеваний), так и интенсификацией промысла (селективное изъятие крупных самок и травматическая смертность). Стоит отметить, что изменения, в том числе и негативные, в репродуктивных параметрах баренцевоморской популяции отмечались норвежскими и отечественными учеными

еще в начале XXI века, практически сразу после первой вспышки численности интродуцента и начала его промысла, в том числе и браконьерского [14, 20, 22, 23]. Например, в Ура-губе, на базе его круглогодичного прибрежного мониторинга, в 1995–2002 гг. отмечалось устойчивое уменьшение плодовитости [14]. Уменьшение на 30% индивидуальной плодовитости самок камчатского краба в наиболее многочисленных размерных классах от 120 до 150 мм в промысловый сезон 1999–2000 гг. по сравнению с 1994–1998 гг. отмечали и другие исследователи [16]. По мнению авторов этих работ, главной причиной снижения плодовитости являются официальный промысел и браконьерский лов, приводящие к омоложению нерестового стада за счет изъятия крупных самцов и, частично, самок. Последнее повышает травматизм самок, в первую очередь, крупных, а также находящихся на их абдомене икринок.

Изменения в репродуктивных параметрах баренцевоморской популяции в последние годы увеличивают сходство этих характеристик с таковыми у нативных популяций камчатского краба. Значения максимальных размеров самок с икрой в 2010–2022 гг. (172–178 мм по ШК) в Западном и Центральном районах, где акклиматизация прошла в среднем на 10 лет раньше, чем в Восточном районе [1] вписываются в пределы варьирования максимальных размеров икроносных самок нативного ареала (161–203 мм по ШК) [10; 17; 31]. В Восточном районе в этот период встречались самки большего размера (199–212 мм по ШК), однако с 2008–2010 гг. модальные размеры самок с икрой в этом районе ежегодно снижались и с 2014 г. статистически значимо не отличались от размеров самок Западного и Центрального района (см. рис. 3). Тенденции о статистически значимом снижении среднего размера 50%-го созревания самок в ходе акклиматизации (со 120.1 мм по ШК в 2002–2007 гг. до 118.4 мм по ШК в 2011–2022 гг.), отмеченные в норвежских фьордах [19], не подтверждаются нашими данными на всем временном ряду как в общем по российской части Баренцева моря, так и по отдельным районам в частности. С 1995 по 2022 гг. статистически значимое увеличение среднего размера 50%-го созревания самок произошло в Западном районе с 115 до 123 мм по ШК, в Центральном районе с 118 до 122 мм по ШК и в Восточном районе с 115 до 121 мм по ШК. Средние размеры 50%-го созревания самок тихоокеанского региона весьма вариативны (73–112 мм по ШК), но в общем существенно уступают баренцевоморским значениям, полученным как в норвежских, так и российских водах. В литературе указываются следующие возможные факторы, влияющие на снижение размеров 50%-го созревания самок камчатского краба: менее благоприятные температурные условия, снижение объема и качества кормовой базы, а также уменьшение размеров как самцов, так и самок вследствие селективности промысла [19]. В отличие от норвежских вод, где разрешен промышленный лов самок камчатского краба, в российских водах действие негативных факторов, влияющих на снижение размеров 50%-го созревания самок, по всей видимости, пока не наблюдается.

В отличии от скорости полового созревания, негативное снижение как абсолютных показателей плодовитости, так и темпа прироста плодовитости при увеличении ШК самок баренцевоморской популяции свидетельствует о существенных изменениях в формирующейся популяционной структуре акклиматизанта в последние годы. Очевидно, что снижение ИАП связано с уменьшением веса кладки, поскольку между весом кладки и размерами существует более тесная связь по сравнению с ИАП [24, 28, 42]. По мнению некоторых авторов, объем кладки будет зависеть от успешности оплодотворения самки, так как оплодотворенная икра будет удерживаться под абдоменом, а неоплодотворенная будет осыпаться в процессе вынашивания [6, 15]. В свою очередь отмечается, что чем крупнее самец, тем больший объем кладки будет оплодотворен, следовательно, увеличение количества более мелких самцов будет снижать вероятность спаривания крупных самцов с самками, вследствие чего будет снижаться репродуктивный потенциал популяции [14, 40]. Кроме того, экспериментальным путем было доказано, что даже при успешном спаривании часть икры остается неоплодотворенной [32, 34, 36, 38]. Частичная потеря икры вследствие неполного оплодотворения кладки может быть вызвана дефицитом самцов. Лабораторные опыты тех же авторов показали, что один самец может спариваться с несколькими самками, но эффективность оплодотворения с каждым последующим разом снижается. Доля оплодотворенной икры в кладках первой и последующих самок может изменяться от 80 до 12% соответственно. После нереста неоплодотворенная икра так же, как и оплодотворенная, прикрепляется к плеоподам [32]. В дальнейшем неоплодотворенная икра осыпается [29]. Анализ размерного состава самцов в российских водах показывает, что доля крупных особей в уловах в начальный период исследования (1995–2003 гг.) в Западном

и Центральном районе была существенно выше по сравнению с последним периодом исследований (2019–2022 гг.). По нашим данным, в российских водах, за исключением Восточного района, доля самцов с ШК более 200 мм в эти годы снизилась с 31 до 11%, что, возможно, сыграло существенную роль в снижении репродуктивного потенциала самок баренцевоморской популяции камчатского краба в этом регионе. Отрицательные тенденции в размерах крупных самцов также были отмечены во всех исследуемых фьордах в норвежских водах, которые наблюдались в 1995–2011 гг. Снизившись в эти годы доля крупных самцов остается постоянной с 2011 г. [19]. Основной причиной негативных тенденций в динамике размерного состава промысловых гидробионтов, в том числе камчатского краба, как правило, предполагается влияние селективности промысла, направленное на изъятие крупных животных. По всей видимости, увеличение промысловых усилий с приходом крупнотоннажных дальневосточных краболовов в Баренцево море в 2000–2002 гг. существенно повлияло в последующие годы не только на размерный состав промысловых самцов, но и на популяционный репродуктивный потенциал баренцевоморского камчатского краба в целом. Влияние промысла на размерный состав самцов в большей степени отмечалось в Западном и Центральном районах, т. е. в тех районах, где активное расселение краба происходило существенно раньше его промыслового освоения. Наоборот, в Восточном районе эксплуатация популяции началась в период первого массового появления в этом районе промысловых крабов (2002–2005 гг.), которые не успевали достичь максимальных размеров. Поэтому в уловах в этом районе доля крупных самцов на протяжении всего временного ряда была сравнительно ниже по сравнению с уловами в Западном и Центральном районах в годы, предшествующие активному промыслу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы исследования (2019–2022 гг.) камчатского краба в Баренцевом море наблюдается тенденция снижения его репродуктивного потенциала по сравнению с периодом активной акклиматизации, предшествующим промысловой эксплуатации (1995–2003 гг.). Максимальные размеры самок с икрой снизились в среднем со 197 мм до 175 мм по ШК. При этом средний размер 50%-го созревания увеличился со 116 мм до 121 мм по ШК в эти периоды. Значительно ниже стали вес кладки (на 39%) и ИАП (на 30%) для самок одних и тех же размеров, при этом вес икринки также снизился, но менее существенно, в среднем на 12%. Кроме того, скорость прироста плодовитости по отношению к росту ширины карапакса статистически значимо снизилась, что, возможно, связано со снижением количества более крупных самцов, которые, участвуя в размножении, увеличивают успешность оплодотворения большего количества икры, отложенной самкой.

Большинство параметров (ИАП, ИОП, размеры половозрелых самок, вес икринки) баренцевоморской популяции как в российских, так и в норвежских водах стали сопоставимы с параметрами популяций нативного ареала (Берингова и Японского морей).

Статистически значимые отличия в репродуктивных параметрах и трендах взаимосвязей ИАП, ИОП и ШК были обнаружены по разным районам в российских водах Баренцева моря. При этом минимальные репродуктивные показатели (ИАП, ИОП, вес кладки и икринки) были характерны для уловов в Восточном районе, где акклиматизация камчатского краба происходила позднее, по сравнению с западными районами, а его эксплуатация была интенсивнее. Максимальные показатели отмечались для самок, пойманных в Центральном районе, в котором воздействие промысла было минимальным [8].

Несмотря на то, что промысел камчатского краба направлен на изъятие крупных промысловых самцов, его негативное воздействие отмечается также на репродуктивный потенциал эксплуатируемой популяции. При этом в районах, где не закончились акклиматизационные процессы и репродуктивные показатели не достигли максимальных значений, воздействие промысла проявляется существенней по сравнению с районами, где полная натурализация предшествовала активной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимова Н.А.* К вопросу об акклиматизации камчатского краба в Баренцевом море // Камчатский краб в Баренцевом море. Изд. 2-е, перераб. и доп. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003. С. 10–22.
2. *Баканев С.В.* Плодовитость и некоторые другие репродуктивные параметры камчатского краба в Баренцевом море // Камчатский краб в Баренцевом море. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2001. Гл. 3.5. С. 78–88.
3. *Баканев С.В.* Динамика популяции камчатского краба в Баренцевом море (опыт моделирования). Saarbrucken: Lambert Acad. Publ. (LAP). 2011. 151 с.

4. *Баканев С.В., Герасимова О.В., Матьков Д.В.* Основные репродуктивные параметры баренцевоморской популяции камчатского краба *Paralithodes camtschatica* // Исследования промысловых беспозвоночных в Баренцевом море: сборник научных трудов ПИНРО. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1997. С. 5–14.
5. *Герасимова О.В., Кузьмин С.А., Оганесян С.А.* 1996. Исследования камчатского краба в Баренцевом море // Рыбное хозяйство. № 2. С. 34–36.
6. *Золотухина Л.С.* Динамика плодовитости камчатского краба северо-западной части Татарского пролива // Изв. ТИНРО. 2006. Т. 146. С. 183–197.
7. *Изучение* экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. Выпуск 1 // Инструкции и методические рекомендации по сбору и обработке биологической информации в морях Европейского севера и Северной Атлантики. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во ВНИРО, 2004. 300 с.
8. *Камчатский краб* в Баренцевом море. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: ВНИРО, 2021. 712 с.
9. *Клитин А.К.* Камчатский краб (*Paralithodes camtschaticus*) у берегов Сахалина и Курильских островов: биология, распределение и функциональная структура ареала. – М.: Нацрыбресурс. 2003. 253 с.
10. *Кочнев Ю.Р., Галимзянов К.Г.* Особенности созревания и плодовитости некоторых промысловых видов крабов в Сахалино-Курильском районе// 4-я Всесоюзная конференция по промысловым беспозвоночным: Тезисы докладов. Москва. 1986. С. 14–26.
11. *Кузьмин С.А., Гудимова Е.Н.* 2002. Вселение камчатского краба в Баренцево море. Особенности биологии, перспектива промысла. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 236 с.
12. *Матюшкин В.Б.* Репродуктивные параметры самок камчатского краба (Paralithodes camtschaticus, Tilesius) губы Ура Баренцева моря // Тр. ВНИРО. 2005. Т. 144. С. 212–221.
13. *Михеев А.А.* Становление математического моделирования в СахНИРО: успехи и проблемы роста // Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях: Труды СахНИРО. ЮжноСахалинск: СахНИРО. 2012. Т. 13. С. 61–82.
14. *Низяев С.А., Федосеев В.*Я. Причины редукции численности поколения краба и их отражение в его репродуктивной стратегии // Рыбохозяйственные исследования в Сахалинско-Курильском районе и сопредельных акваториях. Южно-Сахалинск: Сахалин. обл. кн. изд-во, 1994. С. 57–67.
15. *Низяев С.А., Федосеев В.Я., Мясоедов В.И., Родин В.Е.* К формированию урожайности поколений камчатского краба Paralithodes camtschatica на Шельфе Западной Камчатки// Промыслово-биологические исследования морских беспозвоночных. М.: ВНИРО. 1992. С. 4–14.
16. *Сенников А.М., Шацкий А.В.* Промыслово-биологическая характеристика урагубской группировки камчатского краба // Биоресурсы и аквакультура в прибрежных районах Баренцева и Белого морей. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2002. С. 98–109.
17. *Blau S.F.* Size at maturity of female red king crabs (*Paralithodes camtschaticus*) in the Adak management area, Alaska// Proceedings of the International Symposium on King and Tanner Crabs. – Alaska Sea Grant College Program. 1990. Rep. № 90–94. P. 105–116.
18. *Gerasimova O.V. Kuzmin S.A.* Some peculiarities of reproduction of king crab *Paralithodes camtschatica* (Til.) in the Barents Sea. ICES C.M. 1995. N. 1995/K:29. 10 p.
19. *Hjertaas H.W.* Size composition, reproductive investment, and fecundity of red king crab (*Paralithodes camtschaticus*) in Finnmark fjords, 1994–2022 (manuscript). University of Tromsø. 2023. 72 p.
20. *Hjelset, A.M.* Female life-history parameters in the introduced red king crab (Paralithodes camtschaticus, Tilesius 1815) in the Barents Sea: a study of temporal and spatial variation in three Norwegian fjords (manuscript). University of Tromsø. 2012. 39 p.
21. *Hjelset, A. M., J.H. Sundet, and E.M. Nilssen*. 2009. Size at sexual maturity in the female red king crab (*Paralithodes camtschaticus*) in a newly settled population in the Barents Sea // Norway. J. Northw. Atl. Fish. Sci. V. 41. P. 173–182.
22. *Hjelset A.M., Nilssen E.M., Sundet J.H.* Reduced size composition and fecundity related to fishery and invasion history in the introduced red king crab (*Paralithodes camtschaticus*) in Norwegian waters // Fisheries Research. 2012. V. 113. P. 73–80.
23. *Hjelset A.M., Sundet, J.H. Nilssen E.M*. Size at sexual maturity in the female red king crab (*Paralithodes camtschaticus*) in a newly settled population in the Barents Sea, Norway // J. Northw. Atl. Fish. Sci. 2009. V. 41 P. 173–182.
24. *Koop K., Field J.G.* The influence of food availability on population dynamics of a supralittoral isopod, *Ligia dilatata* Brandt // J. Exp. Marine Biol. Ecol. 1980. V. 48. N1. P. 61–72.
25. *Kruse G.H*. Biological perspectives on crab management in Alaska. In: Kruse, G.H., Eggers, D.M., Marasco, R.J. et al. (Eds.), Proceedings of the International Symposium on Management Strategies for Exploited Fish Populations. University of Alaska Sea Grant Rep. 1993. V. 93–02, P. 355–384.
26. *Microsoft Corporation*. Microsoft Excel. 2018. https://office.microsoft.com/excel
27. *Murua, H., Kraus G., Sabrido-Rey F. et al*, Procedure to estimate fecundity of marine fish species in relation to their reproductive strategy // J. Northw. Atlant. Fish. Sci. 2003. V. 33. P. 33–54.

28. *Nazari E.M., Simões-Costa M.S., Müller Y.M.R.et al.* Comparisons of fecundity, egg size, and egg mass volume of the freshwater prawns *Macrobrachium potiuna* and *Macrobrachium olfersi* (Decapoda, Palaemonidae) // Journal of Crustacean Biology. 2003. V. 23. N4. P. 862–868.
29. *Nizyaev S.A., Fedoseev V.Y.* Disorders of the reproductive cycle in crab females of the genus Paralithodes // Proc. of the Intern. Symp. on King and Tanner Crabs: Univ. Alaska Sea Grant Rep. Rep. 1989. № 90–04. P. 91–94.
30. *Otto R.S.* Management and assessment of eastern Bering sea king crab stocks // Jamieson G.S., Bourne N. (eds.). North Pacific Workshop on Stock Assessment and Management of Invertebrates. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 1986. V. 92. P. 83–106.
31. *Otto R.S., Macintosh R.A., Cummiskey P.A.* Fecundity and other reproductive parameters of female red king crab (*Paralithodes camtschaticus*) in Bristol Bay and Norton Sound, Alaska// Proceedings of the International Symposium on King and Tanner Crabs. University of Alaska Sea Grant.1989. Rep. № 90–04. P. 65–90.
32. *Paul A.J.* A review of size at maturity in male tanner (*Chinoecetes bairdi*) and king (*Paralithodes camtschaticus*) crabs and the methods used to determine maturity // Amer. Zool. 1992. V. 32. P. 534–540.
33. *Paul J.M., Paul A.J.* Reproductive success of sublegal size male red king crab with access to multiple mates // Proceedings of the International King and Tanner Crab Symposium, University of Alaska Fairbanks. Alaska Sea Grant College Program Rep. 1990. V. 90–04. P. 37–50.
34. *Paul J.M., Paul A.J.* Breeding success of sublegal size male red king crab *Paralithodes camtshatica* (Tilesius, 1815) (Decapoda, Lithodidae) // J. Shellfish Res. 1990. V. 9. P. 29–32.
35. *Paul A.J., Paul J.M.* A note on energy costs of molting and egg production for female red king crab (Paralithodes camtschaticus). In: High Latitude Crabs: Biology, Management, and Economics, University of Alaska Fairbanks. Alaska Sea Grant College Program Rep. 1996. V. 96–02. P. 354–363.
36. *Powell, G.C., Nickerson, R.B.* Reproduction of king crabs, *Paralithodes camtschatica* (Tilesius) // J. Fish. Res. Board Can. 1997. V. 22. P. 101–111.
37. *Powell G.C., James K.E., Hurd C.L.* Ability of male king crab, *Paralithodes camtschatica*, to mate repeatedly, Kodiak, Alaska // Fish. Bull. 1973. V. 72. P. 171–179.
38. *Powell G.C., Nickerson R.B.* Reproduction of king crabs *Paralithodes camtschatica* (Tilesius) // J. Fish. Res. Bd. Canada. 1965. V. 22 (1). P. 101–111.
39. *Powell G.C., Shafford B., Jones M.,* Reproductive biology of young adult king crabs Paralithodes camtschatica (Tilesius) at Kodiak, Alaska // Proc. Natl. Shellfish. Assoc. 1973. V. 63. P. 77–87.
40. *Sato T., Goshima S.* Impacts of male-only fishing and sperm limitation in manipulated populations of an unfished crab, *Hapalogaster dentata* // Mar. Ecol. Prog. 2006. Ser. V. 313. P. 193–204.
41. *Schmidt D., Pengilly D.* Alternative red king crab fishery management practice: modelling the effects of varying size–sex restrictions and harvest rates // Proceedings of the International King and Tanner Crab Symposium, University of Alaska Fairbanks. Alaska Sea Grant College Program Rep. 1990. V. 90–04. P. 551–565.
42. *Swiney K.M., Webb J.B., Bishop G.H., Eckert G.*L. Temporal and Spatial Variability of Alaska Red King Crab Fecundity, and Accuracy of Clutch Fullness Indices in Estimating Fecundity. In: G.H. Kruse, G.L. Eckert, R.J. Foy et al. (eds.), Biology and Management of Exploited Crab Populations under Climate Change. Alaska Sea Grant, University of Alaska Fairbanks. 2010. P. 265–282.
43. *R Core Team*. R.A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. https://www.R-project.org/. 2022.
44. *Venables W.N., Ripley B.D.* Modern Applied Statistics with S. New York. Springer. Fourth. https://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4/. 2002.
45. *Wahle R.A.* Revealing stock–recruitment relationships in lobsters and crabs: is experimental ecology the key? // Fish. Res. 2003. V. 65. P. 3–32.
46. *Wallace M.M., Pertuit C.J., Hvatum A.R.* Contribution to the biology of the king crab (*Paralithodes camtschatica* Tilesius) // US Dept. Interior Fish Wildl. Serv. Fish. Leaflet 340, Washington. DC. 1949. 53 p.
47. *Wickham H.* ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. https://ggplot2.tidyverse.org. 2016.
48. *Wilke C.O.* ggridges: Ridgeline Plots in 'ggplot2'. https://CRAN.R-project.org/package=ggridges. 2022.
49. *Whitlock M.C., Schluter D.* The analysis of biological data, Ben Roberts, W.H. Freeman Company. 2009. 818 p.

FEATURES OF REPRODUCTIVE CAPACITY DEVELOPMENT OF RED KING CRAB DURING ITS ACCLIMATIZATION IN THE BARENTS SEA

S. V. Bakanev*, T. V. Shamray

Polar Branch of "VNIRO" ("PINRO" named after N.M. Knipovich), Murmansk, Russia

** e-mail: bakanev@pinro.ru*

The paper deals with a comparative analysis of the Barents Sea red king crab fecundity, size composition and sizes of 50%-mature individuals. The analysis was carried out with the focus on the period of the expansion and acclimatization of the species before commercial exploitation and on the present when crab is actively taken. Based on the literature data, the difference was reviewed between the above-mentioned parameters and that in the red king crab native habitat. According to the recent research data (2019–2022), the Barents Sea red king crab show a decreasing trend of its reproductive capacity compared to that in the period of active acclimatization before commercial exploitation (1995–2003). The maximum carapace width (CW) of berried females decreased on the average from 197 mm to 175 mm whereas the average CW size of 50%-mature individuals increased from 116 mm to 121 mm in these periods. There was a significant decrease found in the weight of eggs in a clutch (39%) and individual absolute fecundity (30%) of same-sized females. The weight of an egg also decreased by 12% on the average. In addition to that, there is a statistically significant decrease in fecundity per CW that may be attributed to the fact that there is a decrease in number of large males that are engaged in the reproduction and contribute to effective fertilization of more eggs laid by a female. Changes of the reproductive features of the Barents Sea red king crab population over the last few years make it more similar to native populations in the Pacific.

Keywords: red king crab, the Barents Sea, female maturity, fecundity, acclimatization

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 642–652

МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ

УДК 599.53:59.087

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕДПОЛАГАЕМЫХ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ “КОНТАКТНЫХ СИГНАЛОВ” БЕЛУХ *DELPHINAPTERUS LEUCAS* ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИХ СЕЗОННЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СКОПЛЕНИЙ: ПИЛОТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

© 2024 г. Е. М. Панова[1, *], А. В. Агафонов[1, 2]

[1] *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

[2] *Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН – филиал ФГБУН ФИЦ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Феодосия, пгт. Курортное, Россия*

** e-mail: baralginsp@yandex.ru*

Поступила в редакцию 02.08.23 г.
После доработки 22.08.2023 г.
Принята к публикации 09.11.2023 г.

С недавних пор при исследовании афалин *Tursiops truncatus* применяется метод индивидуальной акустической идентификации, основанный на распознавании дельфинов по уникальным для каждой особи сигналам – “свистам-автографам”. Некоторые другие виды зубатых китообразных, возможно, также обладают индивидуально-специфичными сигналами: например, у белух *Delphinapterus leucas* это так называемые контактные сигналы. В данном пилотном исследовании мы оценили возможность использования предполагаемых контактных сигналов белух для получения сведений о посещаемости, численности и индивидуальном составе их локальных скоплений в естественной среде. Показано, что разнообразие контактных сигналов может служить приемлемым показателем численности особей, присутствующих на акватории; кроме того, эти сигналы потенциально применимы для индивидуальной акустической идентификации у белух.

Ключевые слова: китообразные, белуха *Delphinapterus leucas*, акустическая коммуникация, контактные сигналы, индивидуальная акустическая идентификация

DOI: 10.31857/S0030157424040082, **EDN:** PRKREI

ВВЕДЕНИЕ

Китообразные – уникальная группа млекопитающих, перешедших к полностью водному образу жизни. Ведущее значение в их жизнедеятельности приобретает акустическая сигнализация: китообразные используют звук для коммуникации, ориентации, навигации, а также при поиске и поимке добычи [30, 67]. Акустические сигналы китообразных могут содержать идентификационную информацию различного рода, на основе которой потенциально возможно акустическое распознавание видов [9, 12, 13, 50], популяций [10, 54] и даже отдельных особей [34].

Ярким примером сигналов с выраженной индивидуально-специфичной структурой являются свисты-автографы афалин *Tursiops truncatus* [15]. Эти сигналы имеют уникальный для каждой особи характер частотной модуляции (“частотный контур”, видимый на спектрограмме), который играет ключевую роль в индивидуальном распознавании дельфинов [17, 34, 61, 66]. Полагают, что свисты-автографы служат для поддержания контакта и координации между членами группы, при этом их доля может составлять более 90% от всех сигналов, издаваемых дельфином [17, 35, 77]. Свисты-автографы формируются в течение первого года жизни особи, постепенно приобретая стереотипность (т. е. стабильность частотно-временных параметров) частотного контура [16], после чего могут оставаться неизменными на протяжении 12–25 лет [39, 60].

Благодаря стереотипной структуре и продуцированию в виде серий свисты-автографы могут быть идентифицированы в аудиозаписях, полученных в естественной среде, когда невозможно изолировать дельфина от группы или локализовать источник звука [33], а высокая индивидуальная специфичность частотного контура позволяет распознавать сигналы разных особей при визуальном анализе спектрограмм [32, 59]. Таким

образом, свисты-автографы могут быть использованы для выявления и отслеживания отдельных особей аналогично фотоидентификации – методу, основанному на индивидуальном распознавании животных по естественным маркерам на теле, который применяется в исследованиях китообразных с начала 1970-х гг. [78]. Метод индивидуальной акустической идентификации был апробирован в нескольких популяциях афалин [3, 11, 43], позволив получить данные о численности, структуре групп и пространственно-временном распределении особей. В будущем он, возможно, может быть распространен и на другие виды зубатых китообразных. Так, на сегодняшний день получены прямые или косвенные свидетельства наличия сигналов с индивидуально-специфичной структурой у других видов дельфинов [24, 28, 42, 69], а также представителей семейства нарваловых – нарвала *Monodon monoceros* [7, 62] и белухи *Delphinapterus leucas* [47, 49, 53].

Белухи населяют арктические и субарктические воды Северной Америки и Евразии и наряду с некоторыми другими видами морских млекопитающих признаны одним из ключевых видов-индикаторов состояния арктических экосистем [68]. Благодаря высокой вокальной активности белух акустический мониторинг в настоящее время является эффективным инструментом при проведении долгосрочных исследований их встречаемости, сезонного распределения и миграций [18, 21, 26, 40]. Хотя функции большинства типов вокализаций белух остаются малопонятными [5, 64], исследования последних лет позволили выявить так называемые контактные сигналы – стереотипные, многократно повторяющиеся звуки, которые эти китообразные издают в ситуациях изменения состава группы, рождения или смерти детеныша, при стрессовых условиях, а также в вокальных обменах между животными [47–49, 53, 72, 73]. Эти сигналы представляют собой серии широкополосных импульсов, иногда содержащие дополнительный узкополосный компонент, в соответствии с чем обозначаются как “простые” и “комплексные” контактные сигналы [74]. Стереотипная структура контактных сигналов позволяет подразделять их на отдельные типы, различимые визуально (по спектрограммам) и на слух [53, 73, 74]. Исследования в неволе показывают, что индивидуальные вокальные репертуары белух могут содержать от одного до 2–4 вариантов контактных сигналов, которые уникальны для особи или небольшой социальной группы – обычно матери и ее потомства [8, 47, 49, 53, 73]. У свободноживущих белух также были обнаружены похожие по структуре и возможной функции сигналы [70, 73–75]. Их типовое разнообразие напрямую связано с количеством особей, присутствующих в период проведения записи, что согласуется с тем, что дикие белухи, так же как содержащиеся в неволе, обладают индивидуально- и/или семейно-специфичными сигналами [52, 74]. Предполагают, что в сообществах этих китообразных индивидуально-специфичные сигналы могут быть необходимы для поддержания индивидуализированных связей, тогда как общие семейные типы сигналов – служить для взаимного распознавания матери и потомства в больших скоплениях животных [73, 74].

Таким образом, подобно свистам-автографам афалин, контактные сигналы белух представляются хорошим кандидатом в качестве “акустических маркеров” отдельных особей или социальных групп, что позволяет использовать их как идентификационный инструмент при проведении исследований белух в естественной среде. Например, для популяции белух из эстуария р. Св. Лаврентия уже инициированы работы по сопоставлению конкретных типов сигналов с особями, идентифицированными по фотографиям [74]. Наше исследование осеннего скопления белух в устье р. Варзуга (Белое море, Россия) показало, что возможные контактные сигналы, среди которых удалось выделить несколько десятков типов, могут составлять более половины вокальной продукции белух [52]. Хотя условия записи не позволяли установить конкретных продуцентов сигналов, анализ вокальных последовательностей, основанный на измерениях интервалов между соседними звуками, показал, что сигналы разных типов, по-видимому, принадлежали разным особям (т. е. были индивидуально-специфичны), а характер их продуцирования был сходен с вокальными обменами [52]. В данном пилотном исследовании мы оценили возможность использования предполагаемых контактных сигналов (без их привязки к конкретным особям) в дополнение к количественным показателям вокальной активности белух для мониторинга их встречаемости и численности в местах сезонных локальных скоплений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сбор данных

Полевые работы были проведены в устье р. Варзуга (66° 16′ N, 36° 56′ E), расположенном на южном побережье Кольского полуострова (Кандалакшский залив Белого моря, Россия),

с 30 августа по 25 сентября 2019 г. Появление белух в районе устья приурочено к осенней нерестовой миграции атлантического лосося (семги) *Salmo salar*, пик которой приходится на конец сентября – ноябрь [76]. Группы белух, посещающих устье в это время, состоят преимущественно из взрослых самцов, что подтверждают результаты генетического анализа проб, полученных методом биопсии: показано, что все отобранные в октябре 2010–2012 гг. образцы ($N = 21$) принадлежали самцам [63]. По-видимому, такое смещение выборки в сторону самцов является результатом поло-возрастной сегрегации стад [63], характерной для этих социальных китообразных [46].

Подводные акустические сигналы белух записывали с помощью сферического гидрофона, установленного у дна реки приблизительно в 150 м от устья и соединенного кабелем с регистрирующей аппаратурой, расположенной на берегу. Для записи использовали цифровой рекордер Tascam DR-60D MK2 (40 Гц – 40 кГц +0.5/–3 дБ, 16 бит, частота дискретизации 96 кГц). Расположение гидрофона вблизи устья позволяло записывать звуки как от зашедших в реку белух, так и от животных, находящихся в море напротив устья. Однако в последнем случае часть сигналов могла быть акустически изолирована расположенной здесь песчаной косой (рис. 1).

Продолжительные круглосуточные аудиозаписи, сохраняемые в файлы объемом по 500 Мб, были сделаны с 1 по 25 сентября 2019 г. (за исключением двух технических перерывов: в течение 3 ч 5 сентября и 16 ч – в ночь с 21 на 22 сентября). Параллельные визуальные наблюдения осуществлялись в светлое время суток (с 6:00 до 19:00–20:00) невооруженным глазом или с помощью биноклей (7 × 50) с берега на высоте около 2 м над уровнем моря (рис. 1). Численность белух оценивалась приблизительно по количеству животных, наблюдаемых в момент всплытия для вдоха, и может рассматриваться как минимальное число животных, реально присутствующих на акватории.

Формирование каталога потенциальных контактных сигналов белух

Анализ полученных аудиозаписей проводили в программе Adobe Audition 3.0 (1992–2007 Adobe Systems Inc.). Аудиофайлы, не содержащие сигналов белух, были удалены, а все обнаруженные сигналы или их серии (за исключением эхолокационных сигналов) были сохранены в виде отдельных файлов с указанием даты и времени записи. Среди сигналов были выбраны стереотипные повторяющиеся звуки – сигналы со стабильными частотно-временными параметрами, встреченные в записях два или более раз. На основе

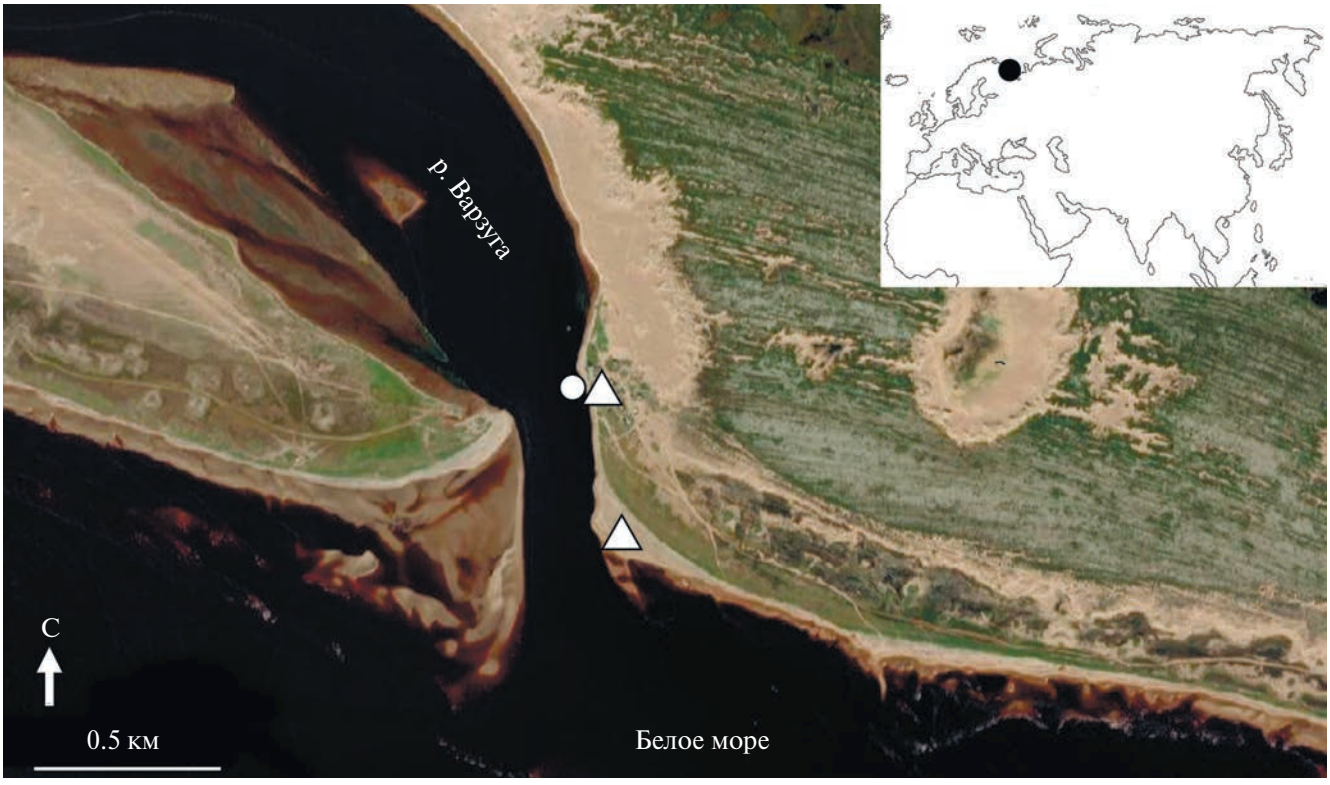

Рис. 1. Схема района проведения работ (источник изображения: www.arcgis.com). Кругом обозначено место установки гидрофона, треугольниками – точки береговых визуальных наблюдений.

визуального сходства спектрограмм и звучания эти сигналы были разделены на отдельные типы, которым были присвоены порядковые номера. Данный подход, основанный на субъективном визуальном и аудиторном анализе звуков, широко используется при классификации вокализаций зубатых китообразных [32, 37, 42, 55, 58, 59], в том числе белух [48, 74]. Потенциальные контактные сигналы среди выделенных типов звуков были идентифицированы по критериям, сформулированным в ранее опубликованных работах [74, 75]: это стереотипные широкополосные простые импульсные или комплексные двухкомпонентные сигналы длительностью не менее 0.4 с, которые хотя бы раз были обнаружены в виде серии из двух или более однотипных сигналов, следующих друг за другом с интервалом не более 10 с. Из отобранных типов сигналов был сформирован каталог потенциальных контактных сигналов (которые далее будем обозначать как “контактные сигналы”).

Анализ данных

Для каждого дня наблюдений были получены два показателя вокальной активности белух: суточное количество акустических сигналов, косвенно определенное как суммарная продолжительность отобранных аудиофайлов со звуками белух (выражено в секундах), и количество идентифицированных типов контактных сигналов. Для более детального анализа было сформировано десять одночасовых аудиофрагментов (не более одного за сутки), соответствующих периодам, когда белухи наблюдались непосредственно в реке в районе места установки гидрофона, но отсутствовали в море напротив устья. Для каждого часового фрагмента были получены три показателя вокальной активности белух: частота сигнализации (сигналов/час), рассчитанная для всех сигналов и только для контактных сигналов, и количество идентифицированных типов контактных сигналов. Для оценки взаимосвязи между показателями вокальной активности белух и их численностью была использована ранговая корреляция Спирмена. Поскольку аудиозаписи за 5, 21, 22 и 25 сентября не охватывали полные сутки, они не были включены в анализ суточных данных. Статистический анализ поведен в ППП Statistica 8.0 (1984–2008 StatSoft Inc.).

РЕЗУЛЬТАТЫ

За 25 дней проведения аудиозаписей акустические сигналы белух регистрировались 22 дня, из которых 19 дней животные также наблюдались визуально. Количество единовременно наблюдаемых белух, входящих в реку или покидающих ее, варьировало от 1 до 19 особей, и в целом было выше во второй половине сентября (рис. 2). В группах были отмечены только взрослые (белые) белухи, и только однажды (23 сентября) была замечена особь с детенышем. Все случаи, когда животные не наблюдались визуально, но были зарегистрированы акустически, приходились на темное время суток.

Всего было получено 172 ч 46 мин аудиозаписей, содержащих, по оценке, более 10 тыс. звуков белух. Среди них было выделено >200 типов стереотипных сигналов, из которых 121 тип соответствовал критериям контактных сигналов и вошел в каталог. 61 тип контактных сигналов, будучи зарегистрирован впервые, был встречен в последующие дни (рис. 3, 4). Некоторые типы отмечались ежедневно с момента первой регистрации или с промежутками в 1–2 дня. Количество типов контактных сигналов, обнаруженных за сутки, варьировало от 1 до 41. Наибольшее количество типов регистрировалось начиная с 18 сентября, при этом 18–20 сентября наблюдался максимальный прирост новых типов сигналов (рис. 2, 3).

Показана сильная положительная корреляция между максимальным количеством белух, зарегистрированным в течение дня, и суточным количеством акустических сигналов ($r_s = 0.91$, $p < 0.001$, $N = 21$), а также количеством идентифицированных типов контактных сигналов ($r_s = 0.93$, $p < 0.001$, $N = 21$). Анализ часовых записей также показал сильную корреляцию между количеством белух и частотой сигнализации, рассчитанной для всех сигналов ($r_s = 0.90$, $p < 0.001$, $N = 10$), рассчитанной только для контактных сигналов ($r_s = 0.89$, $p < 0.001$, $N = 10$), а также количеством идентифицированных типов контактных сигналов ($r_s = 0.97$, $p < 0.001$, $N = 10$) (рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ

Данная работа продемонстрировала, что показатели вокальной активности белух могут служить удобным индикатором их присутствия и относительной численности в местах локальных скоплений. Переход от акустических данных к оценке абсолютного числа животных в зоне приема гидрофона является актуальной и не до конца решенной задачей. Достаточно простой и доступный способ расчета может быть основан на показателях частоты сигнализации – количестве сигналов, зарегистрированных за единицу времени [71]. Однако частота сигнализации

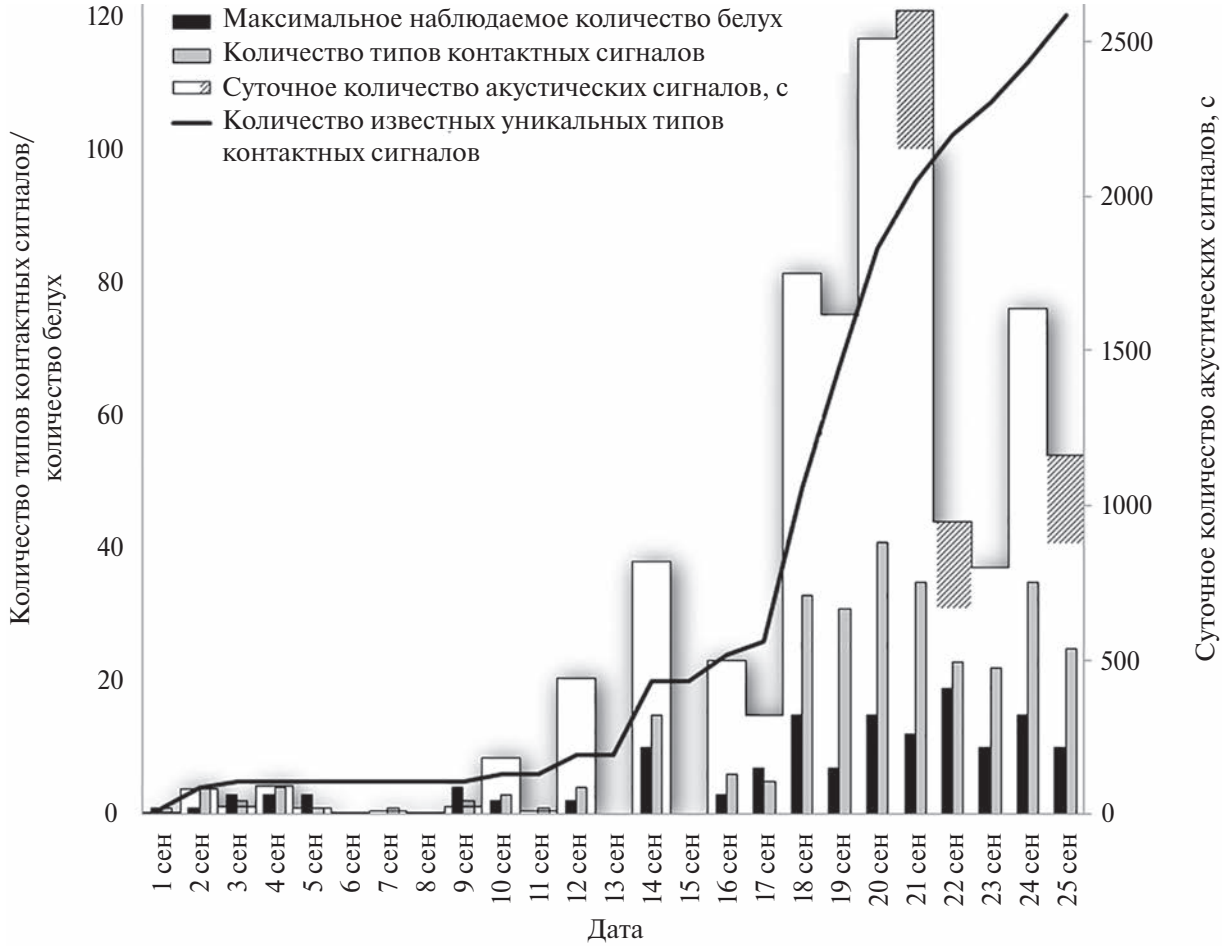

Рис. 2. Динамика вокальной активности (суточное количество акустических сигналов и количество типов контактных сигналов) и максимальной численности белух, единовременно наблюдавшихся на акватории, в период с 1 по 25 сентября 2019 г. Линией отображено накопление известных типов контактных сигналов. Данные за 5, 20, 21 и 25 сентября охватывают неполные сутки; для этих дней введена пропорциональная поправка к суточному количеству акустических сигналов, учитывающая недостающее количество часов (обозначена штриховкой).

не всегда служит надежным признаком размера групп китообразных, поскольку может варьировать в зависимости от типа их активности и состава [19, 25, 36, 56], времени суток [20, 27] и других факторов [14, 41], а также в разных популяциях [36]. Так, в смешанных скоплениях беломорских белух, состоящих преимущественно из самок и неполовозрелых особей, частота сигнализации была на порядок выше, чем в группах взрослых животных из Варзуги, и варьировала в зависимости от типа их активности [2, 5, 52]. При этом она могла не зависеть от общей численности присутствующих животных, а в расчете на особь даже могла уменьшаться с увеличением числа животных [Панова, неопубл. данные] – так же, как у афалин [22, 56]. Для белух характерны как вспышки акустической активности – например, при социальных взаимодействиях [2] или тревоге [1], так и необычайная молчаливость – возможно, как стратегия затаивания [38]. Интенсивность продуцирования белухами контактных сигналов также зависит от пола, возраста или ситуации [47, 48, 51, 73]. Например, в естественной среде контактные сигналы чаще встречались в стадах с детенышами (11.8% от всех сигналов), чем в группах более взрослых животных (6%), и чаще в контексте изоляции (61%), чем во время свободного плавания (10%) [74, 75]. Таким образом, для белух, как и для некоторых других видов морских млекопитающих [44, 57, 71], частота сигнализации может использоваться для расчетов численности групп, однако требует предварительного решения ряда проблем, связанных с контекстной изменчивостью данного параметра: например, коррекции для каждого места, времени и текущих условий [44, 45].

Мы предполагаем, что альтернативным показателем численности групп белух может служить количество типов издаваемых ими контактных сигналов – по крайней мере, в тех случаях, когда

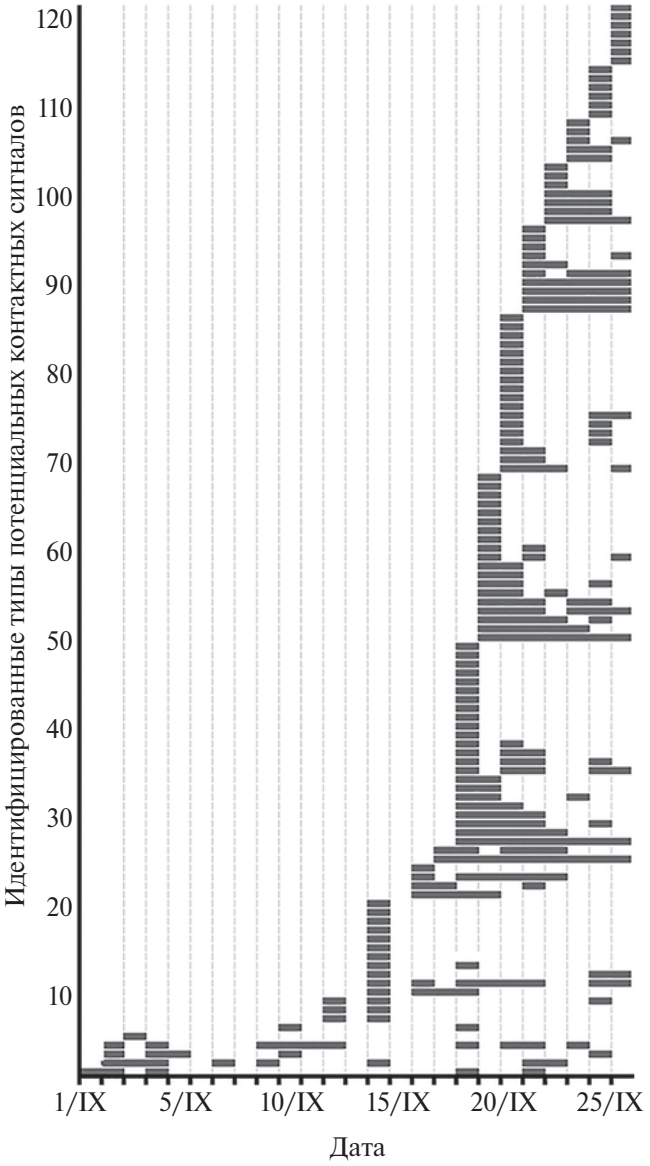

Рис. 3. Встречи 121 типа потенциальных контактных сигналов в каждый день наблюдений с 1 по 25 сентября 2019 г.

эти сигналы составляют существенную долю их вокализаций. Так, в исследовании [74], где авторы имели возможность записывать белух, изолированных в период отлива в одном из дельтовых рукавов р. Каннингэм (зал. Каннингэм, Канада), взаимосвязь между числом особей (без учета детенышей) и разнообразием их контактных сигналов (учитывались только комплексные типы) была очень сильной (линейная регрессия: $R^2 = 0.91$, $N = 14$). При этом количество типов контактных сигналов никогда не превышало число особей, точный подсчет которых был возможен благодаря надводной фотосъемке. Доля контактных сигналов в данной ситуации была достаточно высока, составляя 61% [74]. У варзугских белух контактные сигналы составляли около 58% вокализаций [52], а их разнообразие также выраженно коррелировало с количеством наблюдаемых животных. Таким образом, оценка численности белух в зоне приема гидрофона, основанная на количестве типов контактных сигналов, обнаруженных в аудиозаписях, потенциально может быть реализована с использованием простого регрессионного подхода.

Как и в предшествующих работах [74, 75], в настоящем исследовании предполагаемые контактные сигналы были идентифицированы на основании их стереотипной структуры и серийального характера излучения; при этом конкретные особи – продуценты сигналов не могли быть установлены. Подобный подход, получивший название SIGID – “SIGnature IDentification”, – разработан [33] и используется [31, 43] для выделения свистов-автографов у свободноживущих афалин; однако он нашел применение для выявления возможных индивидуально-специфичных вокализаций и у других видов зубатых китообразных [7, 24]. Мы полагаем, что SIGID-метод может быть адаптирован также для контактных сигналов белух.

Разработка SIGID-метода сделала возможным применение свистов-автографов афалин в рамках метода “мечение – повторный отлов” (“mark – recapture” или “capture – recapture”) [23, 43]. Ключевым моментом данного метода, изначально основанного на мечении и повторном отлове особей из популяции, является способность распознавать животное и определять, обнаружено ли оно повторно или впервые [29]. Помимо данных о численности популяции, на основе индивидуального учета возможно получение других важных популяционных параметров, таких как использование среды обитания, индивидуальные перемещения и связи, выживаемость, расселение и др. [29, 65]. Важными характеристиками свистов-автографов, которые позволяют использовать эти сигналы как индивидуальные акустические маркеры дельфинов, являются высокая частота продуцирования, выраженная индивидуальная специфичность, распространение на дальние расстояния и долгосрочная стабильность [23].

Для апробации подобного подхода в отношении белух в качестве первого шага мы показали возможность отследить отдельные типы потенциальных контактных сигналов на протяжении 25 дней исследования. Основываясь на допущении, что каждый тип сигнала индивидуально-специфичен и соответствуют конкретной

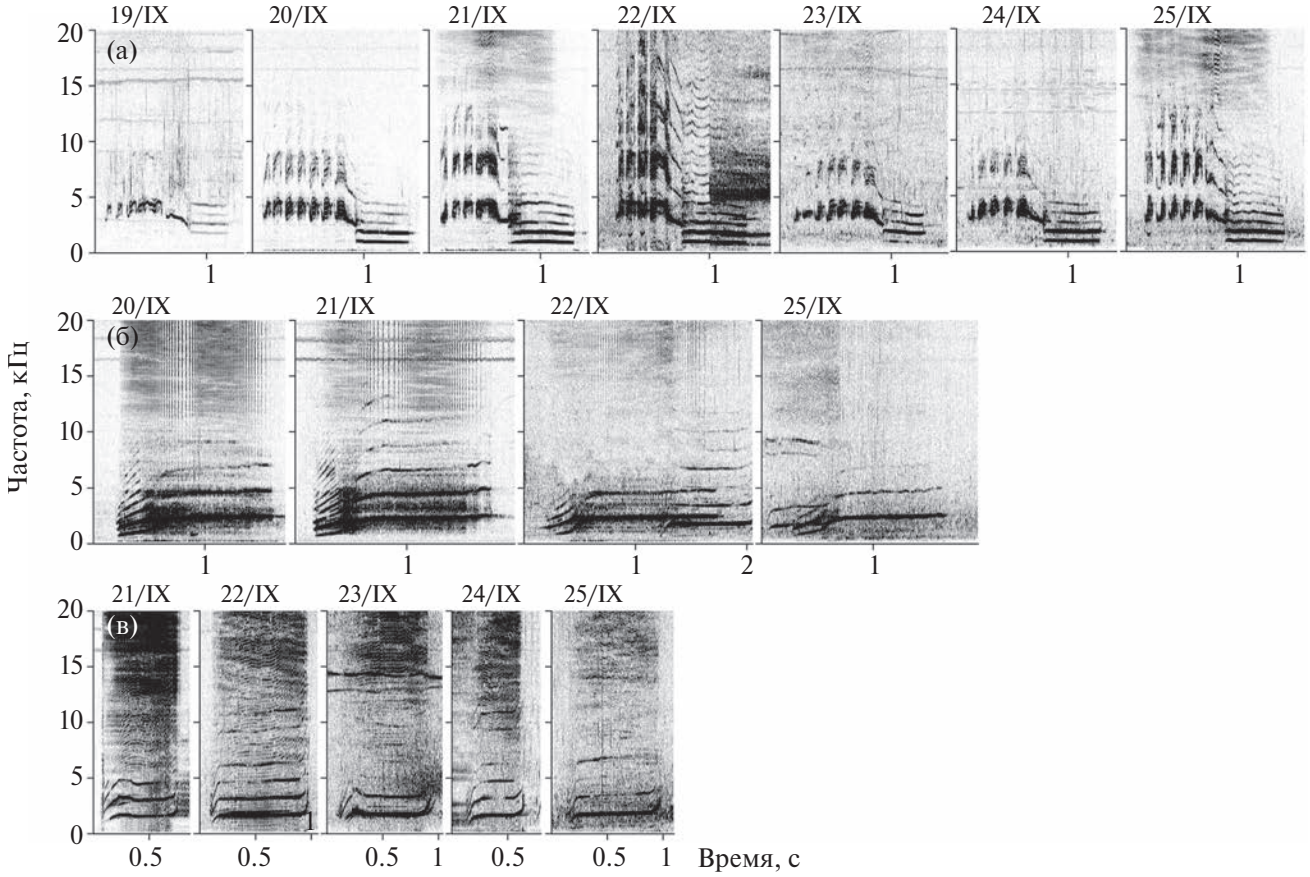

Рис. 4. Примеры потенциальных контактных сигналов белух из устья р. Варзуга. Указаны даты их встреч в аудиозаписях.

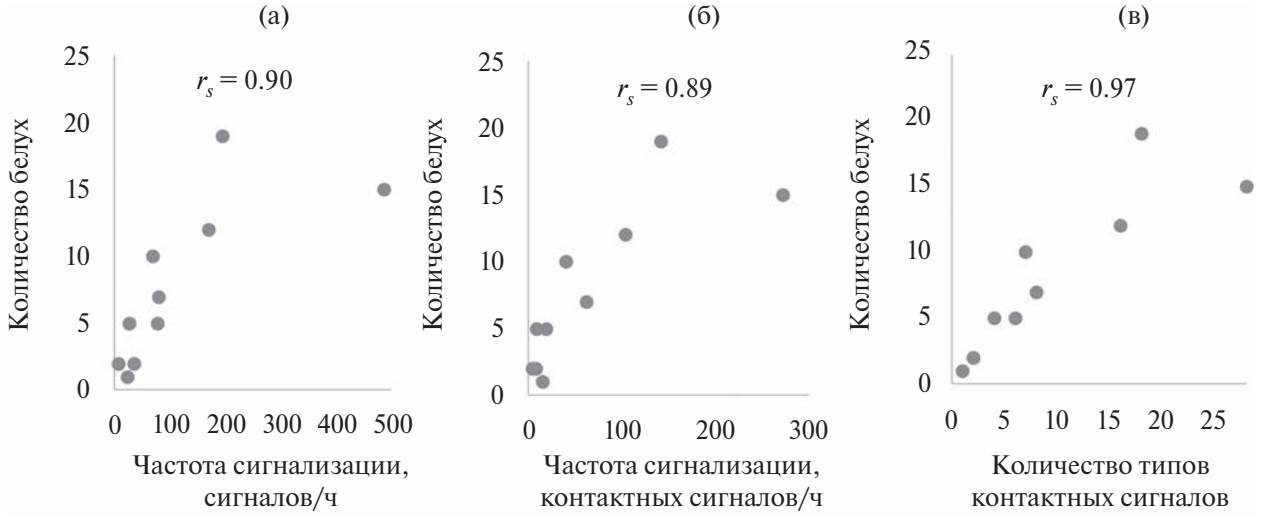

Рис. 5. Взаимосвязь между количеством наблюдаемых белух и частотой сигнализации, рассчитанной для всех сигналов (а), рассчитанной только для контактных сигналов (б), а также количеством идентифицированных типов контактных сигналов (в) в десяти одночасовых аудиозаписях.

особи (косвенные основания для этого были получены ранее: [52]), можно представить следующую гипотетическую картину посещения белухами устья р. Варзуга в сентябре 2019 г. За сутки количество зарегистрированных типов контактных сигналов (до 41) практически всегда превышало максимальное число единовременно наблюдаемых белух (не более 20), что, помимо возможного визуального недоучета, может объясняться сменой индивидуального состава групп, заходящих в устье. Максимальный прирост новых типов сигналов, совпадающий с увеличением числа наблюдаемых животных и суточным количеством их вокализаций, вероятно, мог

быть связан с появлением в данном районе новых особей, приуроченным к началу нерестового хода семги в реку. Всего за период исследования был идентифицирован 121 тип контактных сигналов, что, учитывая обозначенное выше допущение, можно считать минимальной оценкой реального количества особей, посетивших устье за это время. Похожая картина была выявлена в ходе многолетних наблюдений летнего скопления белух у о. Соловецкий в Белом море: хотя в течение суток на акватории может насчитываться 20–30, максимум около 100 белух, по данным фотоидентификации фактическая численность скопления может составлять около 200 особей, обладающих разной степенью привязанности к данной акватории [6].

Несмотря на высокие потенциальные возможности использования контактных сигналов белух для индивидуального акустического учета, их практическое применение по аналогии со свистами-автографами афалин [3, 4, 11, 43] встречает ряд затруднений. Во-первых, белухи реже, чем афалины, издают свои контактные сигналы: у последних на долю свистов-автографов может приходиться более 50% вокализаций в ситуации свободного плавания [19], тогда как у белух она составляет 6–12% [74, 75]. Судя по наблюдениям в неволе, белухи не издают свои контактные сигналы постоянно [47, 51]. Это может привести к неоднородности акустических встреч среди особей, что, впрочем, можно наблюдать и у афалин [43]. Во-вторых, в отличие от “контурных” свистов-автографов, контактные сигналы белух имеют широкополосную импульсную структуру, что осложняет их классификацию, основанную на визуальном анализе спектрограмм. Особенно это касается контактных сигналов, не имеющих узкополосного компонента. В этом случае для выделения индивидуальных типов могут потребоваться инструментальные методы (напр., [47]). Наконец, контактные сигналы белух остаются недостаточно изученными: неизвестно, например, насколько использование общих типов сигналов несколькими особями или наличие нескольких вариаций в индивидуальном репертуаре особи, показанные в неволе [53, 73], распространены среди диких белух; также отсутствуют данные о долгосрочной стабильности контактных сигналов.

На данный момент свисты-автографы афалин являются единственным примером успешного использования идентификационных, индивидуально-специфичных акустических сигналов для изучения сообществ китообразных. В данной работе мы оценили перспективность использования таких сигналов для получения сведений о посещаемости, численности и индивидуальном составе локальных скоплений белух. Мы полагаем, что разнообразие контактных сигналов может служить приемлемым показателем численности особей, присутствующих на акватории; кроме того, эти сигналы потенциально применимы для индивидуальной акустической идентификации. Для дальнейшего развития исследований в данном направлении необходима разработка критериев, позволяющих надежно идентифицировать контактные сигналы без локализации их источника (аналог SIGID-метода, применяемого для афалин), и накопление необходимых сведений об их индивидуальной специфичности и долговременной стабильности. В перспективе возможность выявить и отследить контактные сигналы в аудиозаписях белух делает акустический мониторинг – самостоятельно или в дополнение к традиционным методам исследования (визуальные наблюдения и фотоидентификация) – полезным инструментом для изучения локальных скоплений этих китообразных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Полевые исследования были основаны на наблюдении животных в естественной среде и не приводили к их беспокойству.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках проекта № 23-24-00181.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беликов Р.А., Белькович В.М.* Влияние антропогенного воздействия на акустическую сигнализацию и поведение белух (*Delphinapterus leucas*) // Морские млекопитающие Голарктики. Тезисы докладов Второй международной конференции. 2002. С. 25–26.
2. *Беликов Р.А., Белькович В.М.* Подводная акустическая сигнализация белух (*Delphinapterus leucas*) в репродуктивном скоплении при различных поведенческих ситациях // Океанология. 2003. Т. 43. С. 118–126.
3. *Логоминова И.В., Агафонов А.В.* Локальное сообщество афалин (*Tursiops truncatus ponticus* Barabash, 1940) в акватории юго-восточного Крыма: численность и формирование ассоциаций особей в группах // Океанология. 2021. Т. 61. С. 769–779.
4. *Логоминова И.В., Агафонов А.В., Горбунов Р.В.* Пространственно-временная динамика локальной популяции черноморской афалины (*Tursiops truncatus ponticus* Barabash, 1940): визуальные и акустические методы описания // Океанология. 2019. Т. 59. С. 108–115.

5. *Панова Е.М., Беликов Р.А., Агафонов А.В., Белькович В.М.* Зависимость акустической сигнализации белух (*Delphinapterus leucas*) от поведенческого контекста // Океанология. 2012. Т. 52. С. 85–94.
6. *Чернецкий А.Д., Краснова В.В.* Структура репродуктивного скопления белухи *Delphinapterus leucas* (Pallas, 1776) у острова Соловецкий (Белое море) по результатам фотоидентификации 2007–2013 гг. // Биология моря. 2018. Т. 44. С. 337–346.
7. *Ames A.E., Blackwell S.B., Tervo O.M., Heide-Jørgensen M.P.* Evidence of stereotyped contact call use in narwhal (*Monodon monoceros*) mother-calf communication // PLoS One. 2021. V. 16. P. e0254393.
8. *Ames A.E., Vergara V.* Trajectories of vocal repertoire development in beluga (*Delphinapterus leucas*) calves: Insights from studies a decade apart // Aquat. Mamm. 2020. V. 46. P. 344–366.
9. *Azzolin M., Gannier A., Lammers M.O. et al.* Combining whistle acoustic parameters to discriminate Mediterranean odontocetes during passive acoustic monitoring // J. Acoust. Soc. Am. 2014. V. 135. P. 502–512.
10. *Azzolin M., Gannier A., Papale E. et al.* Whistle variability of the Mediterranean short beak common dolphin // Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst. 2021. V. 31. P. 36–50.
11. *Bailey H., Fandel A.D., Silva K. et al.* Identifying and predicting occurrence and abundance of a vocal animal species based on individually specific calls // Ecosphere. 2021. V. 12. P. e03685.
12. *Baumann-Pickering S., McDonald M.A., Simonis A.E. et al.* Species-specific beaked whale echolocation signals // J. Acoust. Soc. Am. 2013. V. 134. P. 2293–2301.
13. *Berg Soto A., Marsh H., Everingham Y. et al.* Discriminating between the vocalizations of Indo-Pacific humpback and Australian snubfin dolphins in Queensland, Australia // J. Acoust. Soc. Am. 2014. V. 136. P. 930–938.
14. *Buckstaff K.C.* Effects of watercraft noise on the acoustic behavior of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in Sarasota Bay, Florida // Mar. Mammal Sci. 2004. V. 20. P. 709–725.
15. *Caldwell M.C., Caldwell D.K.* Individualized whistle contours in bottle-nosed dolphins (*Tursiops truncatus*) // Nature. 1965. V. 207. P. 434–435.
16. *Caldwell M.C., Caldwell D.K.* The whistle of the Atlantic bottlenosed dolphin (*Tursiops truncatus*) – Ontogeny // Behavior of Marine Animals / Ed. Winn H.E. New York: Plenum Press, 1979. P. 369–401.
17. *Caldwell M.C., Caldwell D.K., Tyack P.L.* Review of the signature-whistle hypothesis for the atlantic bottlenose dolphin // The Bottlenose Dolphin / Eds. Leatherwood S., Reeves R.R. San Diego, California: Academic Press, 1990. P. 199–234.
18. *Castellote M., Small R., Lammers M. et al.* Seasonal distribution and foraging occurrence of Cook Inlet beluga whales based on passive acoustic monitoring // Endanger. Species Res. 2020. V. 41. P. 225–243.
19. *Cook M.L.H., Sayigh L.S., Blum J.E., Wells R.S.* Signature-whistle production in undisturbed free-ranging bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) // Proc. Biol. Sci. 2004. V. 271. P. 1043–1049.
20. *Deconto L.S., Monteiro-Filho E.L.A.* Day and night sounds of the Guiana dolphin, *Sotalia guianensis* (Cetacea: Delphinidae) in southeastern Brazil // Acta Ethol. 2016. V. 19. P. 61–68.
21. *Delarue J., Laurinolli M., Martin B.* Acoustic detections of beluga whales in the northeastern Chukchi sea, July 2007 to July 2008 // Arctic. 2011. V. 64. P. 15–24.
22. *dos Santos M.E., Louro S., Couchinho M., Brito C.* Whistles of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in the Sado Estuary, Portugal: Characteristics, production rates, and long-term contour stability // Aquat. Mamm. 2005. V. 31. P. 453–462.
23. *Fearey J., Elwen S.H., Distiller G., Gridley T.* Improving detectability of dolphin signature whistles for capture-recapture analysis: an examination of array configuration using real-world data // Mar. Mammal Sci. 2022. V. 38. P. 1489–1507.
24. *Fearey J., Elwen S.H., James B.S., Gridley T.* Identification of potential signature whistles from free-ranging common dolphins (*Delphinus delphis*) in South Africa // Anim. Cogn. 2019. V. 22. P. 777–789.
25. *Fripp D., Tyack P.* Postpartum whistle production in bottlenose dolphins // Mar. Mammal Sci. 2008. V. 24. P. 479–502.
26. *Garland E.C., Berchok C.L., Castellote M.* Temporal peaks in beluga whale (*Delphinapterus leucas*) acoustic detections in the northern Bering, northeastern Chukchi, and western Beaufort Seas: 2010–2011 // Polar Biol. 2015. V. 38. P. 747–754.
27. *Goold J.C.* A diel pattern in vocal activity of short-beaked common dolphins, *Delphinus delphis* // Mar. Mammal Sci. 2000. V. 16. P. 240–244.
28. *Gridley T., Cockcroft V.G., Hawkins E.R. et al.* Signature whistles in free-ranging populations of Indo-Pacific bottlenose dolphins, *Tursiops aduncus* // Mar. Mammal Sci. 2014. V. 30. P. 512–527.
29. *Hammond P.S.* Mark–Recapture // Encyclopedia of marine mammals, 2nd edn. / Eds. Perrin W.F. et al. Academic Press, 2009. P. 705–709.
30. *Herman L.M., Tavolga W.N.* The communication systems of cetaceans // Cetacean Behavior. Mechanisms and Functions / Ed. Herman L.M. New York: Wiley and Sons, 1980. P. 149–210.
31. *Hiley H.M., Perry S., Hartley S., King S.L.* What's occurring? Ultrasonic signature whistle use in Welsh bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) // Bioacoustics. 2017. V. 26. P. 25–35.
32. *Janik V.* Pitfalls in the categorization of behaviour: a comparison of dolphin whistle classification methods // Anim. Behav. 1999. V. 57. P. 133–143.
33. *Janik V.M., King S.L., Sayigh L.S., Wells R.S.* Identifying signature whistles from recordings of groups of unrestrained bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) // Mar. Mammal Sci. 2013. V. 29. P. 109–122.

34. *Janik V.M., Sayigh L.S., Wells R.S.* Signature whistle shape conveys identity information to bottlenose dolphins // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 2006. V. 103. P. 8293–8297.

35. *Janik V.M., Slater P.J.B.* Context-specific use suggests that bottlenose dolphin signature whistles are cohesion calls // Anim. Behav. 1998. V. 56. P. 829–838.

36. *Jones G.J., Sayigh L.S.* Geographic variation in rates of vocal production of free-ranging bottlenose dolphins // Mar. Mammal Sci. 2002. V. 18. P. 374–393.

37. *Kaplan M.B., Mooney T.A., Sayigh L.S., Baird R.W.* Repeated call types in Hawaiian melon-headed whales (*Peponocephala electra*) // J. Acoust. Soc. Am. 2014. V. 136. P. 1394–1401.

38. *Karlsen J.D., Bisther A., Lydersen C. et al.* Summer vocalisations of adult male white whales (*Delphinapterus leucas*) in Svalbard, Norway // Polar Biol. 2002. V. 25. P. 808–817.

39. *King S.L., Friedman W.R., Allen S.J. et al.* Bottlenose dolphins retain individual vocal labels in multi-level alliances // Curr. Biol. 2018. V. 28. P. 1993–1999.

40. *Lammers M.O., Castellote M., Small R.J. et al.* Passive acoustic monitoring of Cook Inlet beluga whales (*Delphinapterus leucas*) // J. Acoust. Soc. Am. 2013. V. 134. P. 2497–2504.

41. *Lesage V., Barrette C., Kingsley M.C.S., Sjare B.* The effect of vessel noise on the vocal behavior of belugas in the St. Lawrence River estuary, Canada // Mar. Mammal Sci. 1999. V. 15. P. 65–84.

42. *Lima A., Le Pendu Y.* Evidence for signature whistles in Guiana dolphins (*Sotalia guianensis*) in Ilhéus, northeastern Brazil // J. Acoust. Soc. Am. 2014. V. 136. P. 3178–3185.

43. *Longden E.G., Elwen S.H., McGovern B. et al.* Mark–recapture of individually distinctive calls – a case study with signature whistles of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) // J. Mammal. 2020. V. 101. P. 1289–1301.

44. *Marcoux M., Auger-Méthé M., Chmelnitsky E.G. et al.* Local passive acoustic monitoring of Narwhal presence in the Canadian Arctic: A pilot project // Arctic. 2011. V. 64. P. 307–316.

45. *Marques T.A., Thomas L., Martin S.W.* Estimating animal population density using passive acoustics // Biol. Rev. 2013. V. 88. P. 287–309.

46. *Michaud R.* Sociality and ecology of the odontocetes // Sexual Segregation in Vertebrates: Ecology of the Two Sexes / Eds. Ruckstuhl K.E., Neuhaus P. New York: Cambridge University Press, 2005. P. 303–326.

47. *Mishima Y., Morisaka T., Itoh M. et al.* Individuality embedded in the isolation calls of captive beluga whales (*Delphinapterus leucas*) // Zool. Lett. 2015. V. 1. P. 27.

48. *Mishima Y., Morisaka T., Mishima Y. et al.* Redefinition and sexual difference of contact calls in belugas (*Delphinapterus leucas*) // Aquat. Mamm. 2018. V. 43. P. 538–554.

49. *Morisaka T., Yoshida Y., Akune Y. et al.* Exchange of "signature" calls in captive belugas (*Delphinapterus leucas*) // J. Ethol. 2013. V. 31. P. 141–149.

50. *Oswald J.N., Rankin S., Barlow J., Lammers M.O.* A tool for real-time acoustic species identification of delphinid whistles // J. Acoust. Soc. Am. 2007. V. 122. P. 587–595.

51. *Panova E.M., Agafonov A.V.* A beluga whale socialized with bottlenose dolphins imitates their whistles // Anim. Cogn. 2017. V. 20. P. 1153–1160.

52. *Panova E., Agafonov A.* Possible occurrence of contact calls in all-male groups of free-ranging beluga whales // J. Zool. 2023. V. 320. P. 29–41.

53. *Panova E., Agafonov A., Belikov R., Melnikova F.* Vocalizations of captive beluga whales, *Delphinapterus leucas*: Additional evidence for contact signature "mixed" calls in belugas // Mar. Mammal Sci. 2017. V. 33. P. 889–903.

54. *Papale E., Azzolin M., Cascão I. et al.* Macro- and micro-geographic variation of short-beaked common dolphin's whistles in the Mediterranean Sea and Atlantic Ocean // Ethol. Ecol. Evol. 2013. V. 26. P. 392–404.

55. *Quick N., Callahan H., Read A.J.* Two-component calls in short-finned pilot whales (*Globicephala macrorhynchus*) // Mar. Mammal Sci. 2018. V. 34. P. 155–168.

56. *Quick N.J., Janik V.M.* Whistle rates of wild bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*): Influences of group size and behavior // J. Comp. Psychol. 2008. V. 122. P. 305–311.

57. *Rycyk A.M., Berchem C., Marques T.A.* Estimating Florida manatee (*Trichechus manatus latirostris*) abundance using passive acoustic methods // JASA Express Lett. 2022. V. 2. P. 051202.

58. *Sayigh L., Quick N., Hastie G., Tyack P.* Repeated call types in short-finned pilot whales, *Globicephala macrorhynchus* // Mar. Mammal Sci. 2013. V. 29. P. 312–324.

59. *Sayigh L.S., Esch H.C., Wells R.S., Janik V.M.* Facts about signature whistles of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus* // Anim. Behav. 2007. V. 74. P. 1631–1642.

60. *Sayigh L.S., Tyack P.L., Wells R.S., Scott M.D.* Signature whistles of free-ranging bottlenose dolphins *Tursiops truncatus*: stability and mother-offspring comparisons // Behav. Ecol. Sociobiol. 1990. V. 26. P. 247–260.

61. *Sayigh L.S., Wells R.S., Janik V.M.* What's in a voice? Dolphins do not use voice cues for individual recognition // Anim. Cogn. 2017. V. 20. P. 1067–1079.

62. *Shapiro A.D.* Preliminary evidence for signature vocalizations among free-ranging narwhals (*Monodon monoceros*) // J. Acoust. Soc. Am. 2006. V. 120. P. 1695–1705.

63. *Shpak O.V., Krasnova V.V., Meshchersky I.G.* Annex 18: White Sea (Russia) beluga stock for the global review of Monodontids // Report of the NAMMCO Global Review of Monodontids. NAMMCO, Copenhagen, 2017. P. 163–173.

64. *Sjare B.L., Smith T.G.* The relationship between behavioral activity and underwater vocalizations of the white

whale, *Delphinapterus leucas* // Can. J. Zool. 1986. V. 64. P. 2824–2831.

65. *Smith H.C., Pollock K., Waples K. et al.* Use of the robust design to estimate seasonal abundance and demographic parameters of a coastal bottlenose dolphin (*Tursiops aduncus*) population // PLoS One. 2013. V. 8. P. 2–11.
66. *Tyack P.L.* Dolphins whistle a signature tune. Science. 2000. V. 289. P. 1310–1311.
67. *Tyack P.L., Miller E.H.* Vocal anatomy, acoustic communication and echolocation // Marine Mammal Biology: An Evolutionary Approach / Ed. Hoelzel, A.R. Oxford: Blackwell Science, 2002. P. 142–184.
68. *Tynan C.T., DeMaster D.P.* Observations and predictions of Arctic climatic change: Potential effects on marine mammals // Arcitc. 1997. V. 50. P. 308–322.
69. *Van Parijs S.M., Corkeron P.J.* Evidence for signature whistle production by a Pacific humpback dolphin, *Sousa chinensis* // Mar. Mammal Sci. 2001. V. 17. P. 944–949.
70. *Van Parijs S.M., Lydersen C., Kovacs K.M.* Sounds produced by individual white whales, *Delphinapterus leucas*, from Svalbard during capture // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 113. P. 57–60.
71. *Van Parijs S.M., Smith J., Corkeron P.J.* Using calls to estimate the abundance of inshore dolphins: A case study with Pacific humpback dolphins *Sousa chinensis* // J. Appl. Ecol. 2002. V. 39. P. 853–864.
72. *Vergara V., Barrett-Lennard L.G.* Vocal development in a beluga calf (*Delphinapterus leucas*) // Aquat. Mamm. 2008. V. 34. P. 123–143.
73. *Vergara V., Michaud R., Barrett-Lennard L.* What can captive whales tell us about their wild counterparts? Identification, usage, and ontogeny of contact calls in belugas (*Delphinapterus leucas*) // Int. J. Comp. Psychol. 2010. V. 23. P. 278–309.
74. *Vergara V., Mikus M.-A.* Contact call diversity in natural beluga entrapments in an Arctic estuary: Preliminary evidence of vocal signatures in wild belugas // Mar. Mammal Sci. 2019. V. 35. P. 434–465.
75. *Vergara V., Wood, J., Lesage V. et al.* Can you hear me? Impacts of underwater noise on communication space of adult, sub-adult and calf contact calls of endangered St. Lawrence belugas (*Delphinapterus leucas*) // Polar Res. 2021. V. 40. P. 5521.
76. *Veselov A., Primmer C.R., Zubchenko A. et al.* Diversity of spawning migration and genetic population structuring of Atlantic salmon, *Salmo salar* in the Varzuga River // Лососевидные Рыбы Восточной Фенноскандии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. P. 211–221.
77. *Watwood S.L., Owen E.C.G., Tyack P.L., Wells R.S.* Signature whistle use by temporarily restrained and free-swimming bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus* // Anim. Behav. 2005. V. 69. P. 1373–1386.
78. *Würsig B., Jefferson T.A.* Methods of photo-identification for small cetaceans // Report of the International Whaling Commission (Special Issue 12) / Eds. Hammond P.S., Mizroch S.A., Donovan G.P. Cambridge, 1990. P. 43–55.

USING PRESUMED IDENTIFICATION "CONTACT CALLS" OF BELUGA WHALES *DELPHINAPTERUS LEUCAS* TO MONITOR THEIR SEASONAL LOCAL AGGREGATIONS: A PILOT STUDY

E. M. Panova[a, *], A. V. Agafonov[a, b]

[a] *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[b] *T.I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS – Branch of A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Feodosia, Kurortnoye, Russia*
** e-mail: baralginsp@yandex.ru*

Recently, an acoustic individual identification approach based on the recognition of dolphins by individually distinctive calls – "signature whistles" – has been applied to bottlenose dolphins *Tursiops truncatus*. Some other Odontoceti species may also have individually specific calls: for example, in beluga whales *Delphinapterus leucas*, these are so-called "contact calls". In this pilot study, we tested the possibility of using the presumed contact calls of belugas to obtain information about the occurrence, number, and individual composition of their local aggregations in the natural environment. We conclude that the diversity of contact calls can serve as an acceptable indicator of the number of individuals in the research area; in addition, these calls are potentially applicable for individual acoustic identification in belugas.

Keywords: cetaceans, beluga whale *Delphinapterus leucas*, acoustic communication, contact calls, individual acoustic identification

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 653–661

МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.465.

ПЕРВАЯ НАХОДКА ВИВИАНИТА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ КАРСКОГО МОРЯ

© 2024 г. Н. В. Козина*, Л. Е. Рейхард, М. Д. Кравчишина, А. С. Филиппов, О. М. Дара, Е. А. Новичкова, Л. А. Лозинская, С. В. Сломнюк

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

** e-mail: kozina_nina@bk.ru*

Поступила в редакцию 08.11.2023 г.
После доработки 11.11.2023 г.
Принята к печати 16.11.2023 г.

Впервые в донных отложениях Карского моря обнаружен аутигенный минерал из класса фосфатов – вивианит. Подобные находки вивианита ранее были известны только для внешнего шельфа моря Лаптевых, северной части Баренцева моря и восточной части Белого моря. Его присутствие в подповерхностной осадочной толще свидетельствует об опреснении поверхностного слоя моря. Колонкой 7444, отобранной в тектонической депрессии южной части Карского моря в ходе первого этапа 89-го рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" (2022 г.), вскрыта осадочная толща голоценовых осадков мощностью до 6.19 м. По всей толще, начиная с 0.11 м, обнаружены вивианитовые образования крупноалевритовой и песчаной размерности. Вивианит исследован комплексом методов: оптическая микроскопия, рентгеновская дифракция, сканирующая электронная микроскопия с применением энергодисперсионной спектроскопии. Изучены морфология, микроструктуры и химический состав вивианитовых образований. Выделены три морфологических типа этих образований: микроконкреции и их сростки, кристаллические агрегаты и их сростки и трубкообразные агрегаты.

Ключевые слова: вивианит, фосфаты, аутигенные минералы, диагенез, восстановленные отложения, осадконакопление, литология, Арктический шельф, Карское море

DOI: 10.31857/S0030157424040094, **EDN:** PRJRSE

ВВЕДЕНИЕ

В донных отложениях Карского моря авторами впервые описаны находки вивианитовых агрегатов. Вивианит – минерал из класса фосфатов, водный фосфат железа $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$. Вивианит считается типичным минералом пресноводных сред [28], однако может образовываться в других водных средах [32]. В морских отложениях вивианит кристаллизуется в восстановительных условиях, где поровые воды осадков обеднены сульфидами и, наоборот, обогащены Fe^{2+} и PO_4^{3-}[20, 23, 27, 32, 36]. Вивианитовые образования в арктических морях встречаются редко. Ближайшие из известных находок вивианита в осадках арктических морей относятся к юго-западному шельфу Шпицбергена [27], северной части Баренцева моря (пролив Кембридж) [9], внешнему шельфу моря Лаптевых [28, 34–35] и восточной части Белого моря [31].

Седиментация в арктических шельфовых морях имеет ряд особенностей, отличающих условия осадкообразования в них от таковых в водоемах гумидной зоны. Для осадочного процесса в Северном Ледовитом океане (СЛО) и его морей, в том числе Карского моря, характерен особый тип седиментогенеза – ледовый морской, который на суше (отдельные острова в высоких широтах) соответствует континентальному седиментогенезу зон холодных полярных пустынь, северной тундры и тайги [8]. Здесь господствуют терригенные осадки, специфичные по способам подготовки осадочного вещества, его транспортировки и отложения. Отличительными чертами Карского моря по сравнению с другими морями Евразийского шельфа являются сравнительно небольшие глубины на большой части акватории, обильный пресноводный сток великих рек Сибири (Оби и Енисея), а также относительная изолированность от соседних арктических морей. Южные акватории Карского моря имеют ограниченный водообмен с Баренцевым морем через узкие проливы Карские Ворота и Югорский Шар с запада и с морем Лаптевых через проливы Вилькицкого, Шокальского и Красной

Армии с востока. Довольно высокое содержание в поровых водах осадков растворенного железа (до 1 мкмоль и более) связано с материалом материкового выноса, где в составе растворенных органических веществ (РОВ) преобладают гуминовые вещества, которые образуют растворенные гуминовые производные железа [26]. Фосфор также имеет тенденцию к накоплению в поровой воде осадков Карского моря [13]. Большое значение для формирования состава осадков имеют поверхностные и придонные течения, особенно восточного и южного направлений [8].

Баренцево-Карскоморский ледниковый щит в стадию своего роста (сартанское время, МИС 2) перекрывал западную часть Карского моря. Конечные и боковые моренные гряды покровного оледенения в максимальную стадию его развития маркируют границу распространения ледникового покрова, которая приурочена к положению современной изобаты 100 м [10]. После последнего ледникового максимума около 19 тыс. лет назад арктический шельф подвергся затоплению вследствие обширной трансгрессии океана, при которой уровень моря поднялся примерно на 120 м [18]. Относительно теплые и соленые океанические воды вторглись в районы, ранее являвшиеся прибрежными равнинами [22]. Затопление шельфа Карского моря в ходе постгляциальной трансгрессии происходило в три этапа (18, 11 и 9 тыс. лет назад), во время которых береговая линия находилась на современных изобатах 100, 50 и 30 м соответственно [33]. Голоценовые осадки начали формироваться в период окончания дегляциации около 9 тыс. лет назад, знаменуя морской этап осадконакопления Карского моря. До затопления на этих равнинах происходило формирование речной сети и озер, подпруженных краем ледника [1]. Так, процессы ледникового морфолитогенеза оказали существенное влияние на формирование рельефа дна южной части Карского шельфа, который рассматривается как ледниковый и водно-ледниковый [1, 2, 10, 33].

Несмотря на многочисленные исследования различных факторов формирования современной системы осадконакопления Карского моря, процессы аутигенной минерализации в донных отложениях до сих пор остаются малоизученными.

В статье обсуждаются первые результаты изучения морфологии и состава вивианитовых образований в донных отложениях, отобранных в юго-западной части Карского моря. Проведен комплекс минералогических исследований для идентификации вивианита и высказано предположение об условиях его происхождения. Колонка отобрана в контуритовом дрифте, обнаруженном в одной из переуглубленных (суббатиальных) структурных котловин субмеридионального простирания длиной 18 км и глубиной до 240 м [2, 6, 11, 15], на реликтовой аккумулятивной равнине предположительно флювиогляциального генезиса – Западно-Карской ступени, примыкающей к восточному борту Новоземельской впадины [10]. Данная область отличается сложным изрезанным рельефом дна с перепадом глубин от первых десятков до нескольких сот метров [7]. Формирование ее, вероятно, происходило во время осушения арктического шельфа под воздействием последнего оледенения суши [2, 33].

Базальное несогласие между горизонтально залегающими отложениями и контуритовыми осадками маркирует позднеплейстоцен–голоценовое время возникновения придонных течений, сформировавшихся в результате восстановления морской среды в этом регионе после таяния Баренцево-Карского ледникового щита [2].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Колонка осадков была получена в ходе 89-го рейса (1-й этап) НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2022 г. [5, 11]. Отбор колонки длиной 619 см был выполнен в юго-западной части Карского моря (ст. 7444; координаты: 72° 25.823′ с. ш. и 63° 31.000′ в. д.) с глубины 228 м (рис. 1) при помощи ударной трубки большого диаметра.

Пробы донных осадков были отобраны из рабочей половины керна с дискретностью 1 см на борту судна сразу после поднятия колонки. Литологическое описание осадка и выделение литологических типов были выполнены по методикам, принятым в ИО РАН [3, 12].

Для предварительного анализа колонки через каждые 10 см были отобраны несколько миллилитров осадка, который был промыт дистиллированной водой через лабораторное сито с размером ячеек 63 мкм. Фракция осадка > 63 мкм была высушена и просмотрена под стереомикроскопом Zeiss Stemi 508. При изучении минерального состава и фораминиферовой микрофауны по всей мощности колонки были обнаружены и отобраны агрегаты вивианита [4]. Его идентификация проводилась с помощью рентгеновской дифрактометрии (РД) и полуколичественного анализа геохимического состава с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС).

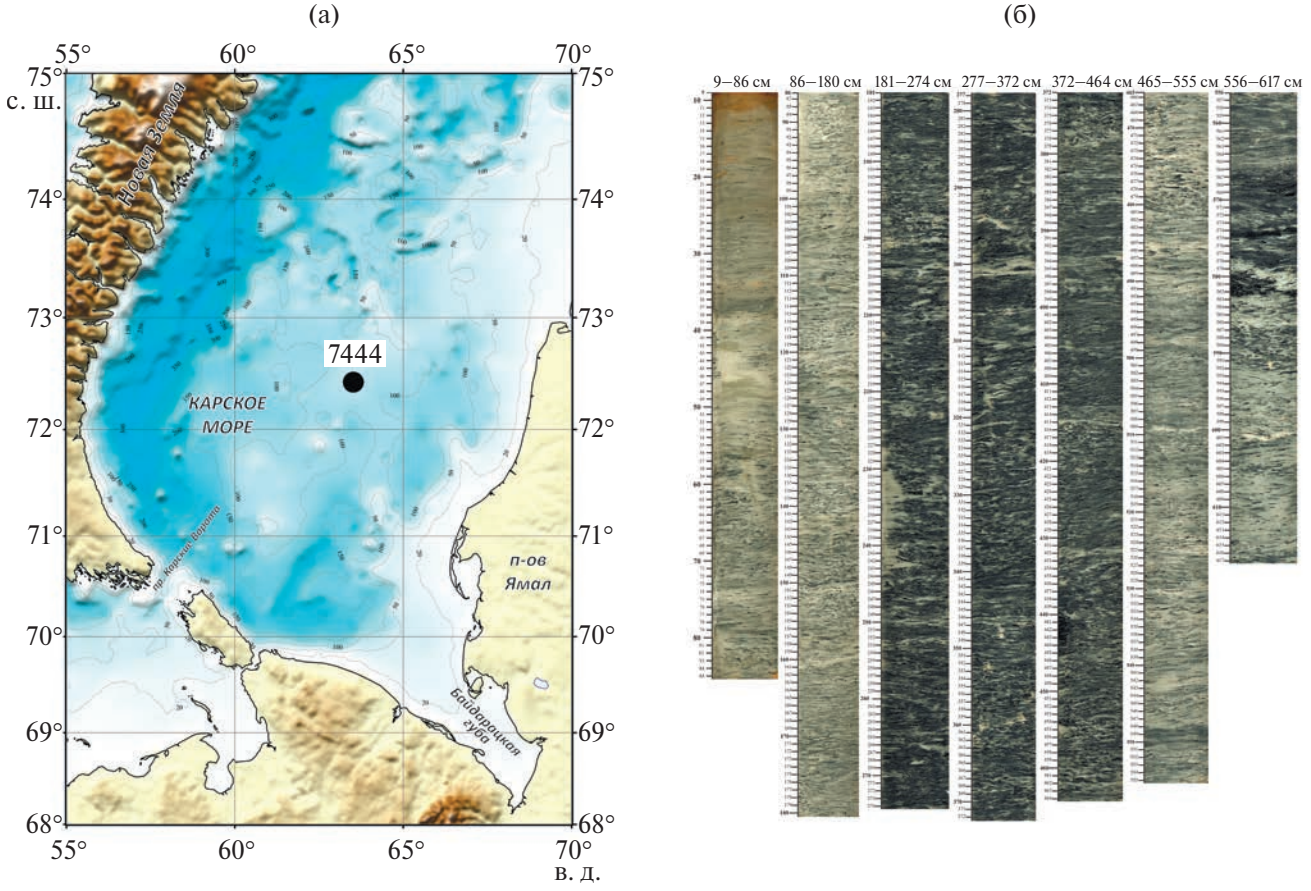

Рис. 1. Карта района опробования в Карском море и положение станции отбора колонки (а); фотография донных отложений колонки (ст. 7444), полученной с помощью системы комплексного сканирования кернов MSCL–XYZ GEOTEK (б).

Вивианитовые агрегаты были изучены методом оптической микроскопии на стереомикроскопах Zeiss Stemi 508 и Nikon SMZ25, РД – на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker AXC, Германия), методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с сопутствующей ЭДС на сканирующем электронном микроскопе SEM Vega 3 Tescan (TESCAN, Чехия) с рентгеноспектральным микроанализатором INCA Energy (OXFORD Instruments, Великобритания). Архивная ненарушенная часть колонки была изучена с помощью автоматизированной системы комплексного исследования кернов (MSCL–XYZ GEOTEK), позволяющей получить представления о цвете и текстурных особенностях осадка, недоступных при визуальном описании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате *литологических исследований* установлено, что вскрытая колонкой осадочная толща мощностью 619 см представлена голоценовыми однородными пелитовыми илами темно-серого цвета с многочисленными включениями гидротроилита – коллоидного моносульфида железа черного цвета. Мощность окисленного слоя не превышала 11 см. В интервале 300–541 см обнаружены единичные раковины двустворчатых моллюсков (рис. 2). Для забоя колонки отмечена характерная пористая текстура, образующаяся при дегазации осадка, очевидно, углеводородных газов, среди которых преобладал метан [14].

При изучении минерального состава осадка (во фракции >63 мкм) с помощью стереомикроскопа по всей мощности восстановленных осадков колонки были обнаружены вивианитовые агрегаты различной морфологии, размера и цвета (рис. 2, 3) [4]. По результатам РД метода было подтверждено, что по своему минеральному составу агрегаты представлены вивианитом (рис. 4). Также было установлено, что в агрегатах вивианита в качестве незначительной примеси (менее 1%) присутствуют обломочные (кварц, плагиоклаз, калиевые полевые шпаты (кпш)) и глинистые минералы (иллит и хлорит).

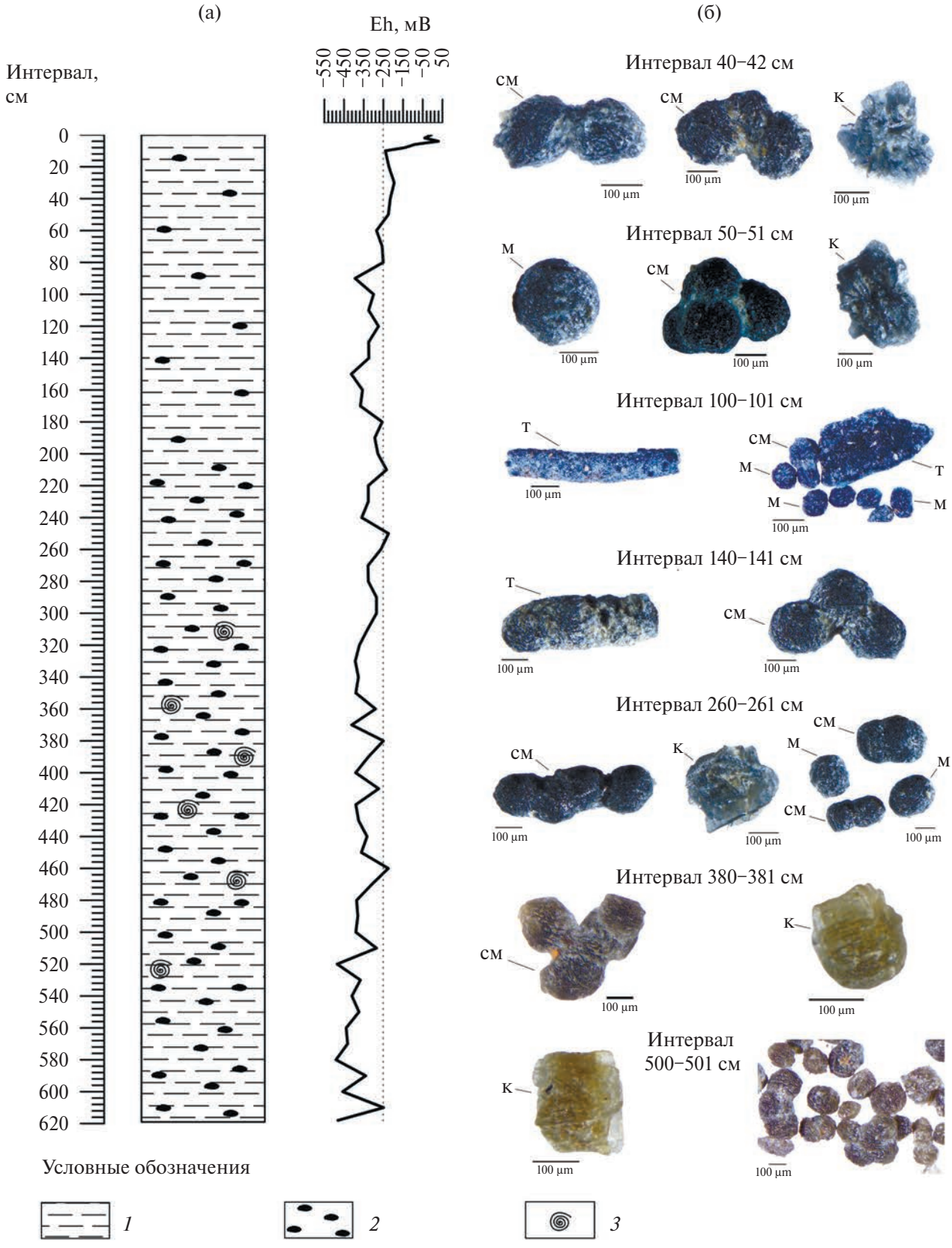

Рис. 2. Распределение морфологических типов вивианита в донных осадках Карского моря на разных глубинах (ст. 7444): (а) литологическая колонка и распределение Eh, мВ: *1* – пелитовый ил, *2* – включения гидротроилита, *3* – включения раковин двустворчатых моллюсков; (б) вивианитовые агрегаты. *Примечание:* м – микроконкреция; см – сростки микроконкреций; к – кристаллические агрегаты; т – трубкообразные агрегаты.

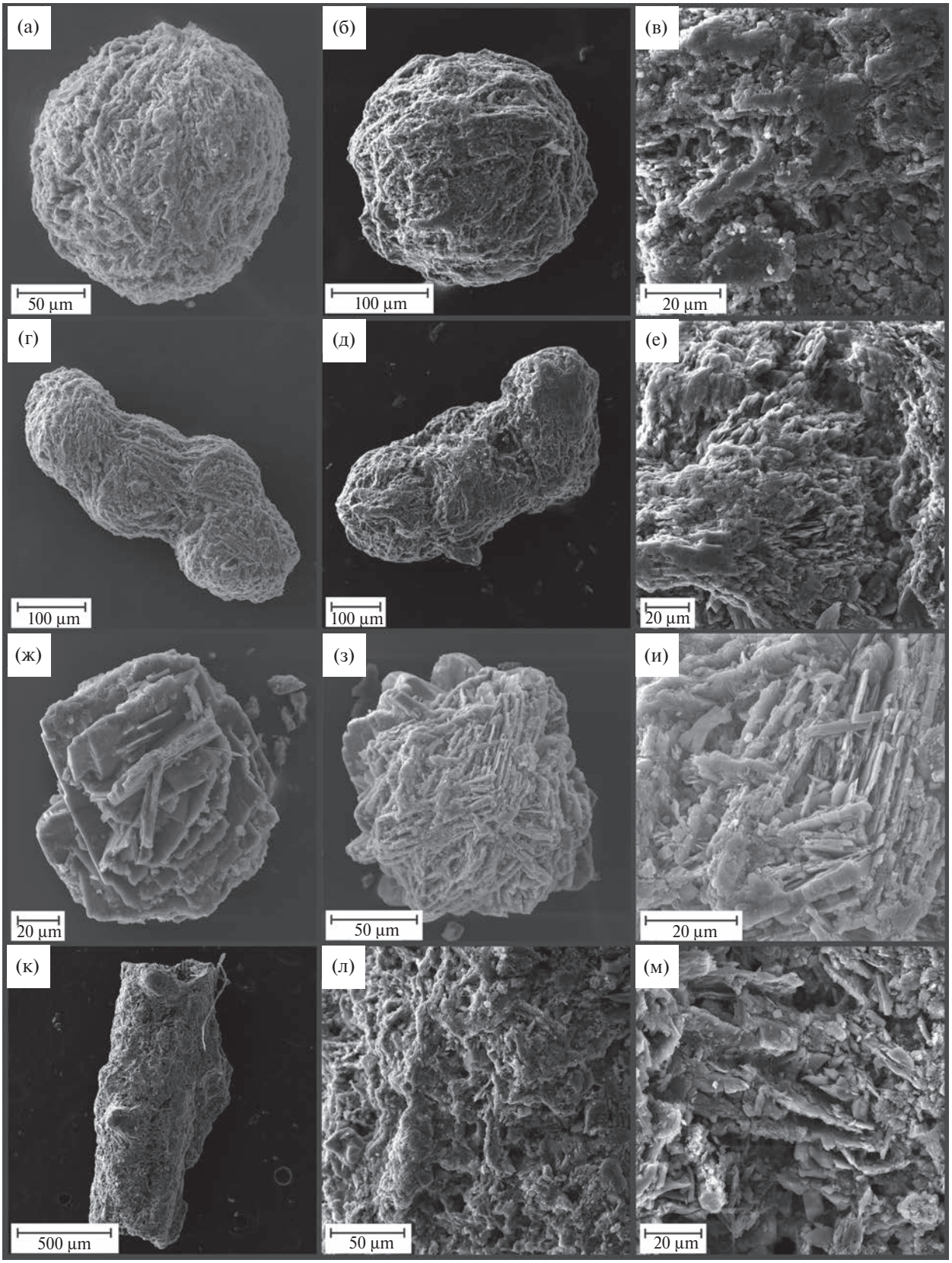

Рис. 3. Морфологические типы вивианитовых образований: (а, б) микроконкреция; (в) структура внешней поверхности микроконкреции; (г, д) сросток микроконкреций; (е) структура внешней поверхности одной из микроконкреций в сростке; (ж, з) кристаллический агрегат; (и) структура кристаллического агрегата; (к) трубкообразный агрегат (трубка); (л) микроструктура внешней поверхности трубки; (м) микроструктура внутренней поверхности трубки.

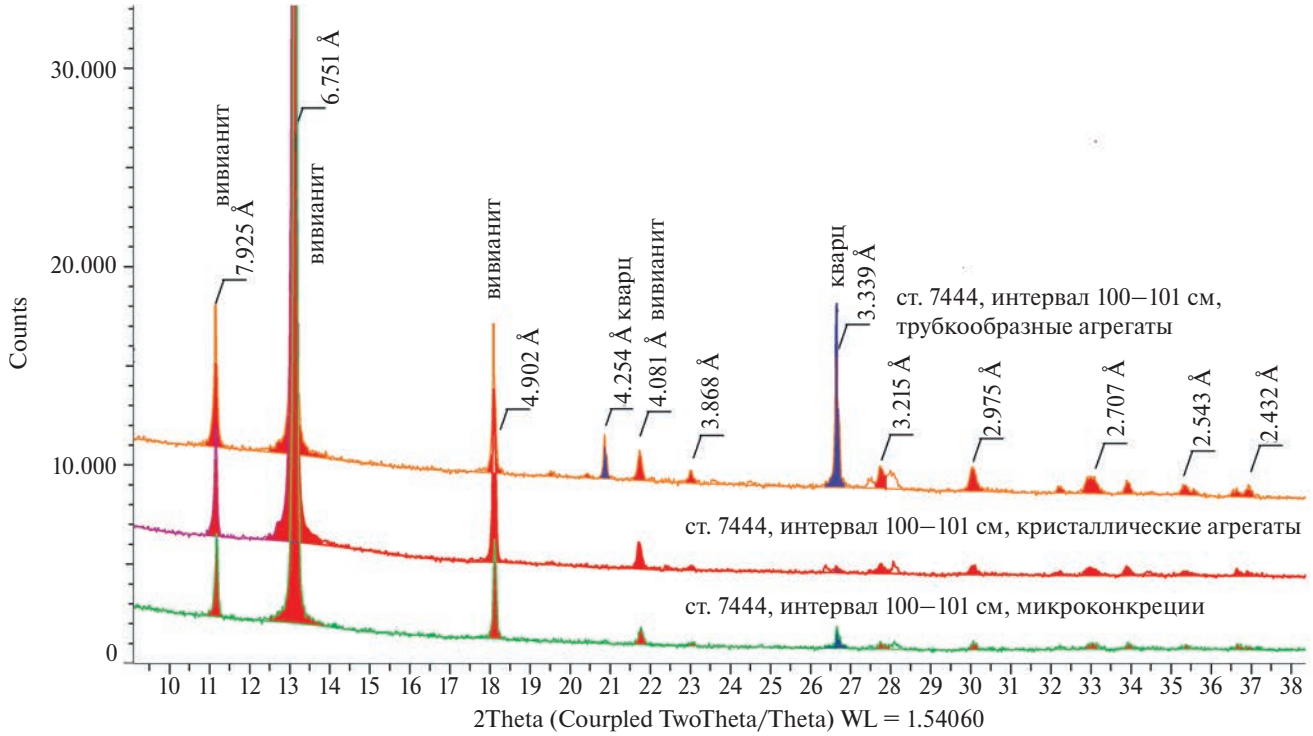

Рис. 4. Дифрактограмма вивианитовых агрегатов в интервале 100–101 см, ст. АМК-7444.

В процессе микроскопических исследований было установлено три морфологических типа вивианитовых образований: 1) микроконкреции, 2) кристаллические агрегаты и 3) трубкообразные агрегаты (трубки) (см. рис. 2, 3). Среди вивианитовых образований на разных глубинах колонки преобладали микроконкреции. Установлено, что микроконкреции и кристаллические агрегаты могут образовывать сростки (см. рис. 2, 3).

Микроконкреции вивианита выявлены по всей длине колонки донных осадков с максимальными концентрациями в следующих интервалах, см: 40–41, 100–101, 140–141, 180–181, 190–191, 200–201, 260–261, 330–331, 350–351, 380–381, 460–461, 500–501, 560–561 (рис. 2). Эти микроконкреции представляют собой сферические и субсферические агрегаты синего, от синего до черно-синего и желтовато-зеленого цветов (см. рис. 2, 3). Поверхность микроконкреций неровная, шероховатая. Диаметр варьирует от 0.1 до 0.5 мм. Преобладающий диаметр – около 0.3 мм. В некоторых интервалах встречены также сростки микроконкреций удлиненно-вытянутой и неправильной формы длиной до 0.5 мм, в составе которых могут присутствовать от 2 до 5 микроконкреций (см. рис. 2, 3). Микроконкреции сложены агрегатами разнонаправленных удлиненно-вытянутых пластинчатых и коротко-призматических кристаллов (рис. 3а–в).

Кристаллические агрегаты вивианита и их сростки встречаются в осадках по всей толще. С 570 см происходит заметное уменьшение количества кристаллических агрегатов. Агрегаты имеют неправильную остроугольную форму и представляют собой сростки пластинчатых кристаллов голубого, синего и зеленого цветов (см. рис. 2, 3) размером от 0.1 × 0.1 мм до 0.2 × 0.3 мм. Сростки кристаллических агрегатов имеют неправильную форму и достигают размеров 0.3 × 0.6 мм (см. рис. 2). Данные СЭМ+ЭДС подтверждают, что агрегаты состоят главным образом из хорошо выраженных, разнонаправленных плоскопризматических и пластинчатых кристаллов вивианита с совершенной спайностью (рис. 3ж–и).

Трубкообразные агрегаты (трубки) вивианита и их фрагменты неоднородного, преимущественно синего цвета были обнаружены в верхних слоях осадка (см. рис. 2), в интервалах, см: 20–21, 40–41, 80–81, 100–101, 110–111, 140–141. Размер трубкообразных агрегатов вивианита варьирует в пределах от 0.5 до 2.0 мм. Методом СЭМ+ЭДС удалось детализировать особенности строения трубок и микроструктуры вещества, которое их слагает (рис. 3к–м). Внутренняя часть трубок сложена хаотично расположенными пластинчатыми или удлиненно-призматическими кристаллами с хорошо выраженными гранями (рис. 3м), а внешняя часть, как правило, более мелкокристаллическая (рис. 3л).

Важно отметить, что цвет вивианита по длине колонки изменяется от светло-голубого и синего (у кристаллических агрегатов вивианита) и от синего и сине-черного (у микроконкреций вивианита) в верхней части колонки до зеленого (кристаллические агрегаты вивианита и микроконкреции вивианита) в нижней части колонки. Синий цвет является характерным результатом окисления фосфатов из группы вивианита [20–21, 30]. Так, цвет вивианита может отражать последовательность окислительно-восстановительных (редокс) процессов раннего диагенеза.

Результаты химического состава микроконкреций, кристаллических агрегатов и трубкообразных образований вивианита, полученные с помощью ЭДС, показали, что минеральное вещество, которым они сложены, соответствуют стехиометрической формуле этого минерала. В его составе установлены высокие концентрации железа (8.1–35.3%), фосфора (7.1–14.4%), марганца (3.3–15.7%) и магния (1.6–5.1%), а также примесь кремния, алюминия, кальция и калия. В кристаллических агрегатах примесь кремния, алюминия, кальция и калия меньше, чем в микроконкрециях и трубкообразных агрегатах, а в некоторых образцах кристаллических агрегатов примесь данных элементов отсутствует. В то же время в кристаллических агрегатах наблюдается более высокое содержание марганца.

Вивианит – водный фосфат железа, представляющий собой конечный продукт анаэробного микробиального процесса восстановления трехвалентного железа (Fe_2O_3) до двухвалентного состояния (FeO) [16]. Несмотря на то что вивианит является диагенетическим фосфатом железа, формирующимся в озерных условиях в обогащенных органическим веществом донных осадках [6–7], существуют свидетельства его нахождения в колонках морских осадков. В морских условиях вивианит образуется в ходе раннего диагенеза осадков в бескислородных условиях [17, 23, 32]. Ближайшие находки вивианита в осадах арктических морей описаны в немногочисленных работах [9, 27, 28, 31, 34, 35]. Изученные вивианитовые образования различных морфологических типов, по мнению авторов, представляют собой аутигенные образования. Морфология кристаллических агрегатов позволяет предположить, что они сформировались *in situ*. Пластинчатые кристаллические агрегаты вивианита, вероятно, в дальнейшем не подвергались существенным изменениям. Также можно предположить, что кристаллический вивианит образовывал сферические агрегаты (микроконкреции) в результате вторичных диагенетических преобразований.

Обогащение вивианитовых агрегатов кремнием и алюминием, вероятно, связано с частицами глинистых минералов, которые могут присутствовать в микроконкрециях и кристаллах в виде включений. Во многих озерных и морских отложениях агрегаты вивианита обогащены магнием (Mg) и марганцем (Mn) [19–21, 25]. Обогащение Mg и Mn может отражать замещение Fe^{2+} на Mn^{2+} и Mg^{2+} в кристаллической решетке вивианита [19–20, 24, 29]. Образование вивианита, богатого Mg и Mn, контролируется поставкой осадочного вещества материкового выноса, которое обогащено гуминовыми веществами, железом, марганцем и другими элементами. Подобные процессы образования аутигенного вивианита в морских осадках Ландсортской впадины Балтийского моря были детально рассмотрены в работе [20].

На данной стадии исследования сложно судить о палеособытиях, которые привели к образованию насыщенной вивианитом осадочной толщи в Карском море. Исследователи, обнаружившие и изучавшие вивианит в море Лаптевых [35], предположили, что наличие микроконкреций вивианита связано с усилением стратификации водной толщи, вызванной опреснением поверхностного слоя моря. Опреснение было в значительной степени обусловлено поступлением талой воды с покровных ледников. Таким образом, образование конкреций вивианита может отражать климатические события, связанные с поступлением талой ледниковой воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены первые данные о морфологии, микроструктуре и химическом составе аутигенного вивианита в восстановленных осадках Карского моря. Выделено три морфологических типа вивианита, отражающие особенности аутигенного минералообразования, редокс-стратификацию осадочной толщи, а также последующие вторичные изменения. По данным анализов сканирующей электронной микроскопии с сопутствующей энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией в составе вивианита установлены Mn и Mg. В морских условиях вивианит является аутигенным минералом, образовавшимся в ходе диагенеза восстановленных осадков. Наша находка вивианита является одним из немногочисленных обнаружений вивианита в отложениях арктического шельфа, требующих дальнейших детальных исследований. Исследование

процессов образования вивианита в Карском море важно для реконструкции региональных палеоокеанологических событий в голоцене, связанных с исчезновением ледниковых покровов и поступлением пресной воды.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН № FMWE-2024-0020. Исследования осадков колонки выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00157-П, https://rscf.ru/project/20-17-00157/.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Клювиткину А.А., Новигатскому А.Н., Душенко Н.В., Матулю А.Г., Якимовой К.С. и Баранову Б.В. за помощь при отборе осадков, а также капитану Горбачу Ю.Н. и экипажу НИС “Академик Мстислав Келдыш”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев М.Н., Архангелов А.А., Басов В.А. и др.* Атлас палеогеографических карт шельфы Евразии в мезозое и кайнозое. Т. 1. М.: ГИН, 1991. 261 с.
2. *Баранов Б.В., Амбросимов А.К., Мороз Е.А. и др.* Позднечетвертичные контуритовые дрифты на шельфе Карского моря // Докл. РАН. Науки о земле. 2023. Т. 511. № 2. С. 102–108.
3. *Безруков П.Л., Лисицын А.П.* Классификация осадков современных морских водоемов // Геологические исследования в дальневосточных морях. Тр. Ин-та океанологии. Т. XXXII. М.: АН СССР, 1960. С. 3–14.
4. *Козина Н.В., Кравчишина М.Д., Новичкова Е.А. и др.* Аутигенные минералы в донных отложениях южной части Карского моря (по материалам 89-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” 2022 года) // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VII Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 г. СПб.: Свое издательство, 2023. С. 298–299.
5. *Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н. и др.* 89-й рейс (1-й этап) НИС “Академик Мстислав Келдыш”: климатический эксперимент во взаимодействии с самолетом-лабораторией ТУ-134 “Оптик” в Карском море // Океанология. 2023. Т. 63. № 3. С. 492–495.
6. *Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р.* Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 2007. 404 с.
7. *Левитан М.А., Хусид Т.А., Купцов В.М. и др.* Типы разрезов верхнечетвертичных отложений Карского моря // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 776–788.
8. *Лисицын А.П., Виноградов М.Е.* Международная высокоширотная экспедиция в Карское море (49-й рейс научно-исследовательского судна “Дмитрий Менделеев”) // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 643–651.
9. *Мурдмаа И.О., Овсепян Е.А., Иванова Е.В., Якимова К.С.* Гранулированный вивианит в проливе Кембридж, Земля Франца Иосифа (Баренцево море) // Литология и полезные ископаемые. 2023. № 4. С. 359–364.
10. *Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Ананьев Р.А. и др.* Рельеф дна и строение верхней осадочной толщи западной части шельфа Карского моря в районе формирования нефтегазовых месторождений // Геология и геолого-разведочные работы. Нефтяное хозяйство. 2022. С. 2–6.
11. Отчет о работах 89 рейса (1-го этапа) НИС “Академик Мстислав Келдыш” (5–18 сентября 2022 г.). Т. 1. М.: ИО РАН, 2022. 380 с.
12. *Петелин В.П.* Гранулометрический анализ морских донных осадков. М.: Наука, 1967. 128 с.
13. *Розанов А.Г.* Геохимия донных отложений Карского моря к западу от полуострова Ямал // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 291–300.
14. *Севастьянов В.С., Федулова В.Ю., Душенко Н.В. и др.* Вертикальный профиль распределения газов в морских осадках вблизи полуострова Ямал // Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: ИО РАН, 2023. Т. II. С. 221–225.
15. *Сломнюк С.В., Новичкова Е.А., Смирнова К.М. и др.* Литолого-микропалеонтологический состав осадков контуритового дрифта из Карского моря // Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: ИО РАН, 2023. Т. I. С. 176–180.
16. *Япаскурт О.В.* Генетическая минералогия и стадиальный анализ процессов осадочного породо- и рудообразования. М.: ЭСЛАН, 2008. 356 с.
17. *Alvi K., Winterhalter B.* Authigenic mineralisation in the temporally anoxic Gotland Deep, the Baltic Sea // Baltica. 2001. V. 14. P. 74–83.
18. *Bauch H.A., Polyakova Ye.I.* Diatom-inferred salinity records from the Arctic Siberian margin: implications for fluvial runoff patterns during the Holocene // Paleoceanography. 2003. № 18(2). P. 501–510.
19. *Dijkstra N., Hagens M., Egger M., Slomp C.P.* Post-depositional formation of vivianite-type minerals alters sediment phosphorus records // Biogeosciences. 2018. V. 15. P. 861–883.
20. *Dijkstra N., Slomp C., Behrends T., and Expedition 347 Scientists.* Vivianite is a key sink for phosphorus in sediments of the Landsort Deep, an intermittently anoxic deep basin in the Baltic Sea // Chem. Geol. 2016. V. 438. P. 58–72.
21. *Egger M., Jilbert T., Behrends T. et al.* Vivianite is a major sink for phosphorus in methanogenic coastal surface sediments // Geochim. Cosmochim. Acta. 2015. V. 169. P. 217–235.

22. *Fairbanks R.G.* A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep ocean circulation // Nature. 1989. V. 342. P. 637–642.
23. *Frederichs T., Von Dobeneck T., Bleil U., Dekkers M.* Towards the identification of siderite, rhodochrosite, and vivianite in sediments by their low-temperature magnetic properties // Phys. Chem. Earth. 2003. V. 28. P. 669–679.
24. *Frost R.L., Martens W., Williams P.A., Kloprogge J.T.* Raman and infrared spectroscopic study of the vivianite-group phosphates vivianite, baricite and bobierrite // Mineral. Mag. 2002. V. 66. P. 1063–1073.
25. *Hsu T., Jiang W., Wang Y.* Authigenesis of vivianite as influenced by methane-induced sulfidization in cold-seep sediments off southwestern Taiwan // J. Asian Earth Sci. 2014. V. 89. P. 88–97.
26. *Köhler H., Meon B., Gordeev V.V. et al.* Dissolved organic matter (DOM) in estuaries of Ob and Yenisei // Siberian river runoff into the Kara Sea: characterization, quantification, variability and environmental significance. Amsterdam: Elsevier Science B.V. 2003. P. 281–308.
27. *Łącka M., Michalska D., Pawłowska J. et al.* Multiproxy paleoceanographic study from the western Barents Sea reveals dramatic Younger Dryas onset followed by oscillatory warming trend // Scientific Reports. 2020. V. 10(1). P. 15667.
28. *Logvina E., Krylov A., Taldenkova E. et al.* Mechanisms of Late Pleistocene authigenic Fe–Mn-carbonate formation at the Laptev Sea continental slope (Siberian Arctic) // Arktos. 2018. V. 4. P. 1–13.
29. *Nakano S.* Manganoan vivianite in the bottom sediments of Lake Biwa, Japan // Mineral. J. 1992. V. 16. P. 96–107.
30. *Nriagu J.O.* Stability of vivianite and ion-pair formation in the system $Fe_3(PO_4)_2$–H_3PO_4–H_2O // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. V. 36. P. 459–470.
31. *Reykhard L., Shulga N., Novichkova Ye. et al.* Biomineral indicators of hydrological, geological and climatic processes in the Arctic // Acta Crystallographica. Section A: Foundation and Advances. 2017. A74. e250.
32. *Rothe M., Kleeberg A., Hupfer M.* The occurrence, identification and environmental relevance of vivianite in waterlogged soils and aquatic sediments // Earth-Science Reviews. 2016. V. 158. P. 51–64.
33. *Stein R., Dittmers K., Fahl K. et al.* Arctic (paleo) river discharge and environmental change: evidence from the Holocene Kara Sea sedimentary record // Quaternary Science Reviews. 2004. V. 23. P. 1485–1511.
34. *Taldenkova E., Bauch H.A., Stepanova A. et al.* Benthic and planktic community changes at the North Siberian margin in response to Atlantic water mass variability since last deglacial times // Mar. Micropaleontol. 2012. V. 96–97. P. 13–28.
35. *Taldenkova E., Nikolaev S., Bauch H.A. et al.* History of ice-rafting and water mass evolution at the Northern Siberian Continental Margin (Laptev Sea) during late glacial and Holocene times // Quaternary Science Reviews. 2010. V. 29 (27–28). P. 3919–3935.
36. *O'Connell D.W., Jensen M.M., Jakobsend R. et al.* Vivianite formation and its role in phosphorus retention in Lake Ørn, Denmark // Chemical Geology. 2015. V. 409. P. 42–53.

THE FIRST FINDING OF VIVIANITE IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE KARA SEA

N. V. Kozina*, L. E. Reykhard, M. D. Kravchishina, A. S. Filippov, O. M. Dara, E. A. Novichkova, L. A. Lozinskaya, S. V. Slomnyuk

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

** e-mail: kozina_nina@bk.ru*

Vivianite, an authigenic mineral from the phosphate class, was discovered in the bottom sediments of the Kara Sea for the first time. Similar finds of vivianite were previously known only for the outer shelf of the Laptev Sea, the northern part of the Barents Sea and the eastern part of the White Sea. Its presence in the subsurface sedimentary strata indicates desalinization of the surface layer of the sea. Corer 7444, sampled in the tectonic depression of the southern part of the Kara Sea during the first stage of the 89th cruise of the R/V *Akademik Mstislav Keldysh* (2022), uncovered the Holocene sedimentary strata up to 6.19 m thick. Vivianite formations of coarse aleurite and sandy grain sizes are found throughout the entire thickness, starting from 0.11 m. Vivianite was investigated by a complex of methods: optical microscopy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy. The morphology, microstructures and chemical composition of vivianite formations were studied. Three morphological types of these formations were identified: microconcretions and their aggregates, crystalline aggregates and their aggregates, and tubiform aggregates.

Keywords: vivianite, phosphates, authigenic minerals, diagenesis, reduced sediments, sedimentation, lithology, Arctic shelf, Kara Sea

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 662–677

МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.424

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА ВЕРХНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОСАДКОВ В ЦЕНТРЕ АКТИВНОЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (СРЕДИННАЯ ДОЛИНА, ХРЕБЕТ ХУАН ДЕ ФУКА, ТИХИЙ ОКЕАН)

©2024 г. В. Б. Курносов*, Ю. И. Коновалов, К. Р. Галин**

Геологический институт РАН, Москва, Россия

**e-mail: vic-kurnosov@rambler.ru*

***e-mail: konsgalin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 07.07.2023 г.
После доработки 29.07.2023 г.
Принята к печати 28.12.2023 г.

В статье представлены результаты изучения изменения химического состава верхнеплейстоценовых осадков из скважины ODP 1036A, пробуренной в Срединной Долине океанического хребта Хуан де Фука на гидротермальном поле “Мертвая собака” до глубины 38.50 м, в 9 м от “черного курильщика” с температурой 268°C. Наиболее существенные изменения химического состава осадков произошли в нижних интервалах скважины. В интервале 20–30.70 м увеличилась концентрация большого количества химических элементов и, соответственно, произошло обеднение гидротермального флюида этими элементами. В интервале 30.70–38.5 м, напротив, концентрация большинства химических элементов уменьшилась, что привело к существенному обогащению этими элементами гидротермального флюида.

Ключевые слова: гидротермальная система, океанический хребет Хуан де Фука, гидротермальное изменение осадков, взаимодействие вода–порода, глубоководное бурение

DOI: 10.31857/S0030157424040109, **EDN:** PRIFLE

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с открытия в 70-х годах прошлого века “черных курильщиков”, основное внимание исследователей сосредоточено на изучении гидротерм, сульфидных отложений и металлоносных осадков, которые расположены на поверхности дна в осевых долинах срединно-океанических хребтов. Состав этих рудообразующих гидротерм формируется под дном в гидротермальных системах, находящихся над магматическими камерами. Изученность изменения пород океанической коры внутри гидротермальных систем в процессе взаимодействия вода–порода, происходящего в недрах океанической коры, сильно уступает изученности гидротермальных источников, гидротермальных и гидротермально-осадочных рудных отложений на поверхности дна. Это относится и к гидротермальным системам в хребтах с осадочным покровом мощностью в сотни метров (в зарубежных публикациях эти океанические хребты называются “sedimented ridges”). В них конвективные гидротермальные системы охватывают не только кристаллический фундамент, но и осадочный покров, в котором при взаимодействии вода–порода происходит изменение вещественного состава осадков и трансформация химического состава рудообразующих растворов, которые разгружаются на дне в виде гидротермальных источников.

Возможность изучения преобразования пород в хребтах, перекрытых осадками, появилась в связи с бурением глубоководных скважин по Международной программе океанского бурения (ODP – Ocean Drilling Program) на гидротермальном поле “Мертвая собака” с действующими высокотемпературными гидротермальными источниками. Наиболее близко к гидротермальному источнику пробурена скважина 1036A. Изменение химического состава осадков из этой скважины не было изучено ранее [15].

Основная задача статьи – изучить изменение химического состава осадков из скважины 1036A, пробуренной до глубины 38.50 м в верхнеплейстоценовых осадках, прилегающих к центральному каналу подъема и разгрузки гидротермального раствора.

Для решения основной задачи были использованы образцы осадков из скважины, отобранные

в кернохранилище Программы океанского бурения (Ocean Drilling Program – ODP), которое находится при Техасском университете (Texas A&M University) в г. Колледж Стейшн (College Station).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Срединная Долина хребта Хуан де Фука является тектономагматической структурой среднескоростного спрединга (58 мм/год) [6]. В Срединной Долине находится гидротермальное поле "Мертвая собака" размером 800 х 400 м с высоким тепловым потоком (до 835 мВт/м^2), на котором расположены 15 гидротермальных источников [6, 7] (рис. 1). В районе гидротермального поля накопилось 250–300 м плейстоценовых гемипелагических осадков с редкими прослоями дистальных турбидитов [6]. На гидротермальном поле была пробурена серия скважин на разном удалении от гидротермальных источников [6, 8].

Скважина 1036A расположена наиболее близко к гидротермальному источнику с температурой 268°C, в 9 м от него (рис. 1). Она пробурена до глубины 38.50 м через толщу воды в 2407 м (рис. 2). В скважине на глубине 20–30 м температура составляет 200°C и выше [8].

Осадки из скважин, пробуренных в северном сегменте Срединной Долины хребта Хуан де Фука на гидротермальном поле "Мертвая собака" и за его пределами, участники проведенного ранее в этом районе рейса ODP 139 разделили на Толщи I, IIA, IIB, IIC, IID, III, IV [6]. Участники рейса ODP 169 приняли это деление осадков и внесли в него некоторые изменения. В результате разрез осадков из скважины 1036A был ими разделен на

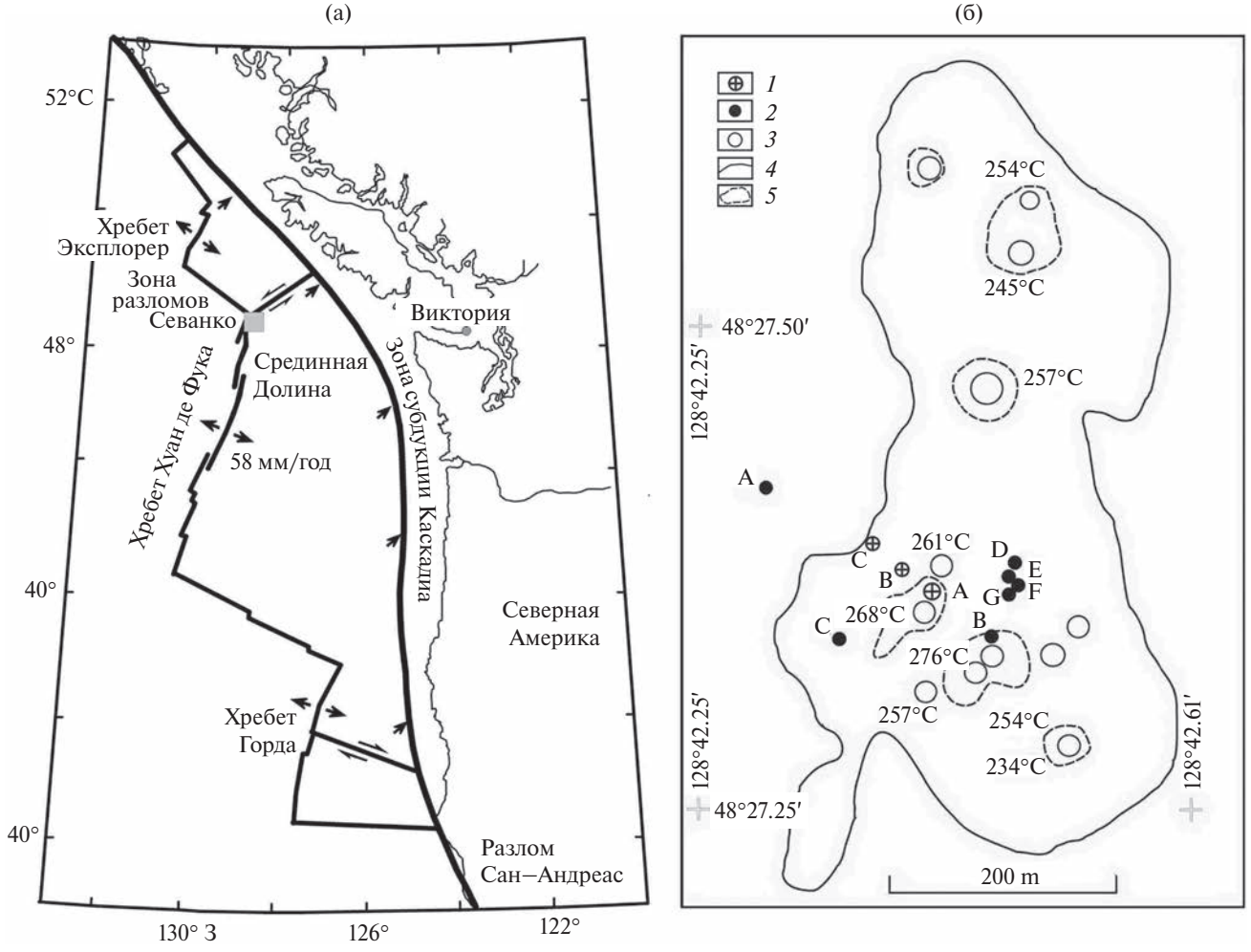

Рис. 1. Структурно-тектоническая схема Срединной Долины хребта Хуан де Фука в северо-восточной части Тихого океана [6], серым квадратом показан район исследований, помещенный на рис. 1б, стрелки показывают направление движения плит (а); и расположение скважин и гидротермальных источников в районе гидротермального поля "Dead Dog" [6, 8] (б): *1* – скважины ODP 1036A, B, C (ODP Рейс 169), скважина 1036A выделена большой буквой A; *2* – скважины ODP 858A, B, C, D, F, G (Рейс ODP 139); *3* – гидротермальные источники; *4* – контур гидротермального поля; *5* – граница гидротермальных отложений.

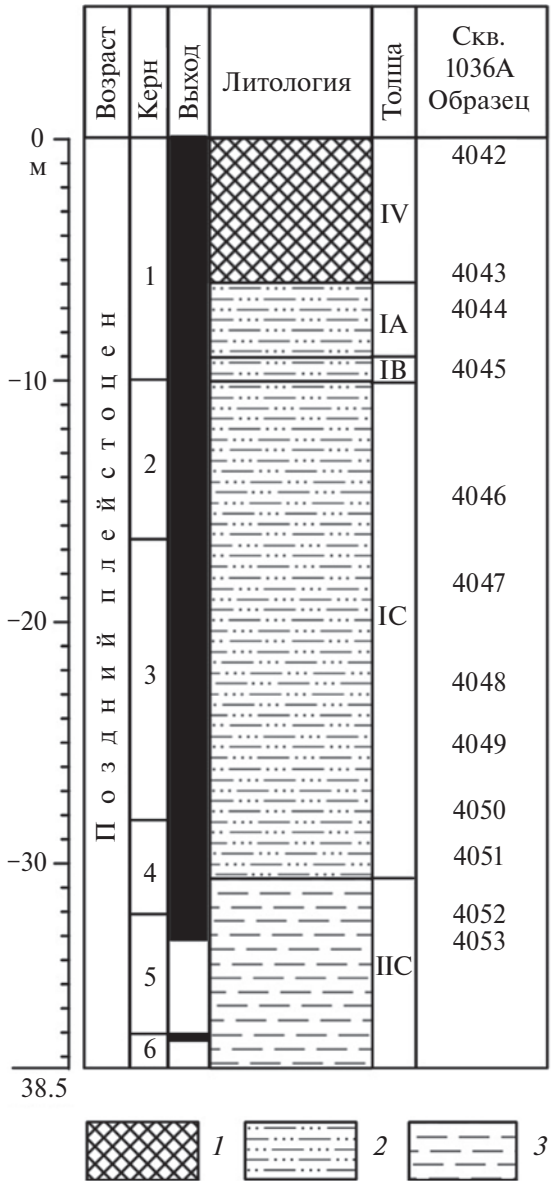

Рис. 2. Литологическая колонка скважины ODP 1036A с расположением образцов: *1* – сульфидный делювий (обломки обрушения сульфидной трубы действующего “черного курильщика”), *2* – алеврито-глинистые гемипелагические осадки, *3* – гемипелагические глины.

Толщи: IA, IB, IC, IIC, IV [8]. Толща I, которая состоит из неизмененных фоновых терригенных осадков, изучена в скважинах ODP 855A, C, D [6], пробуренных в подножии восточного крутого склона Срединной Долины.

Краткое описание осадков этих Толщ, сделанное участниками рейса ODP 169 на борту бурового судна “*JOIDES Resolution*” при визуальном описании керна и изучении в оптическом микроскопе [8]:

Толща IV (0–6.10 м) сложена обломками обрушения сульфидной трубы “черного курильщика”. Отложения Толщи IV подстилаются осадками Толщи IA.

Толща IA (6.10–9.20 м) состоит из неизмененных или слабо измененных гемипелагических алевритовых глин с несколькими тонкими прослоями алевритов. Алевритовые осадки состоят в основном из глинистых минералов с небольшой примесью кальцита, а также содержат примесь кварца, полевых шпатов, роговой обманки, пироксена, эпидота и пирита. В этих осадках встречены обломки обрушения сульфидной трубы “черного курильщика”.

Толща IB (9.20–10.04 м) – алевритовая гемипелагическая глина с карбонатными конкрециями и карбонатным цементом, присутствует карбонат в цементе.

Толща IC (10.04–30.70 м) – измененная гемипелагическая алевритовая глина с аутигенным ангидритом и карбонатными конкрециями.

Толща IIC (30.70–38.50 м) представлена гемипелагическими осадками с тонкими прослоями мелко-тонкозернистых турбидитов (измененные аргиллиты, алевролиты и пески, присутствуют ангидритовый цемент и ангидритовые конкреции, а также карбонатные конкреции).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для всех видов химического анализа образцы осадков растерты до пудры в лабораторном дисковом истирателе (ЛДИ-65 карбид кремния).

Содержание в осадках макроэлементов определено методом рентгено-флюоресцентного анализа (РФА) в лаборатории химико-аналитических исследований в Геологическом институте РАН. Содержание CO_2 определялось титрометрическим методом после выделения соляной кислотой и поглощения раствором щелочи. Содержание гигроскопичной воды определялось путем высушивания образца в течение 4 ч в муфеле при температуре 105°C.

Содержание в осадках микроэлементов, включая редкоземельные элементы, определено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на спектрометре iCAP-6500 Duo (Thermo Scientific, США) в лаборатории ядерно-физических и масс-спектральных методов анализа в Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, г. Черноголовка, Московская область. Информация о методе ИСП-МС, который используется в этой лаборатории, изложена в статье [1].

Изменение химического состава осадков определялось сравнением содержания химических

элементов в них с содержанием химических элементов в неизмененных фоновых терригенных осадках (реперах) из скважин ODP 855A, C, D. Химический состав этих осадков приведен в статье [2]. Пары для такого сравнительного изучения выбраны на основании их близости в петрографическом и гранулометрическом отношении, чтобы не допустить сравнения разнотипных осадков, например, глин с песчанистыми алевритами. Не для всех образцов гидротермально измененных осадков из скважины 1036A есть соответствующие им по петрографическим и гранулометрическим данным образцы неизмененных фоновых осадков из скважин ODP 855A, C, D. Для них спайдерграммы не делались.

Петрографические прозрачные шлифы осадков изучены в оптическом микроскопе BIOptic BP-100.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам гранулометрического анализа осадков из скважины 1036A и фоновых терригенных неизмененных осадков из скважин 855A, C, D, а также просмотра шлифов осадков в оптическом микроскопе, все изученные образцы, по химическому составу которых сделаны спайдерграммы, относятся к алевритовым глинам и глинистым алевритам.

В статье приняты условные границы интенсивности изменения (увеличение/уменьшение) содержания химических элементов в измененных осадках по сравнению с их содержанием в неизмененных фоновых терригенных осадках: слабая (меньше, чем в 2 раза), средняя (в интервале 2–4 раза), сильная (больше, чем в 4 раза).

Изменение химического состава осадков из скважины 1036A. Химический состав осадков из скважины 1036A показан в таблицах 1–3.

Толща IA (обр. 4044)

Макроэлементы. Содержание макроэлементов в осадках Толщи IA не изучалось.

Микроэлементы. В осадках Толщи IA сильно возросла концентрация Ag (рис. 3). На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков произошло увеличение содержания Cu, Cd, Ba, Pb, U (рис. 3).

Таблица 1. Химический состав (вес. %) осадков из скважины ODP 1036A, северный сегмент Срединной Долины, хребет Хуан де Фука

Образец	4045	4046	4047	4048	4049	4050	4051	4052	4053
Керн-секция, интервал (см)	2H-1, 0–10	2H-4, 85–95	2H-7, 0–10	3H-3, 60–70	3H-5, 0–10	3H-7, 10–20	4H-1, 130–140	4H-4, 40–47	5X–CC, 7–13
Толща	IB	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IIC	IIC
Глубина, м	9.50	14.85	18.50	22.60	25.00	28.10	29.80	31.90	33.07
SiO_2	47.46	55.03	68.34	34.06	35.24	35.36	28.89	58.93	67.47
TiO_2	0.77	0.78	0.50	0.80	0.70	0.62	0.39	0.56	0.43
Al_2O_3	13.65	14.74	9.63	15.26	14.15	12.30	10.09	14.00	8.63
Fe_2O_3	2.91	3.88	2.12	3.35	1.67	1.78	1.09	0.72	0.65
FeO	3.04	1.70	1.35	3.11	5.41	2.52	1.35	1.30	1.36
MnO	0.15	0.07	0.12	0.27	0.32	0.15	0.10	0.05	0.05
MgO	7.39	8.22	6.11	23.72	26.23	29.62	16.40	11.98	14.76
CaO	5.56	0.38	0.26	1.42	0.85	4.63	21.622	2.15	0.35
Na_2O	3.89	1.92	1.29	2.28	1.27	1.16	1.09	0.75	0.18
K_2O	1.83	2.58	0.87	0.64	0.39	0.05	0.39	1.36	0.06
P_2O_5	0.29	0.30	0.19	0.29	0.36	0.49	0.41	0.26	0.22
п. п. п.	12.94	10.41	8.86	14.69	12.52	11.42	7.99	7.45	5.32
Сумма	**99.88**	**99.67**	**99.63**	**99.62**	**99.11**	**99.56**	**89.81**	**99.50**	**99.46**
H_2O^-	2.04	2.18	1.48	2.44	2.96	3.68	3.6	1.06	0.63
S	0.73	0.93	0.77	1.31	0.49	1.96	11.07	1.11	0.30
CO_2	6.44	0.44	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.94	0.35	0.34

Таблица 2. Содержание микроэлементов (мкг/г) в осадках из скважины ODP 1036A

Образец	4042	4043	4044	4045	4046	4047	4048	4049	4050	4051	4052	4053
Керн-секция, интервал (см)	1H-1, 0–10	1H-4, 128–138	1H-5, 80–90	2H-1, 0–10	2H-4, 85–95	2H-7, 0–10	3H-3, 60–70	3H-5, 0–10	3H-7, 10–20	4H-1, 130–140	4H-4, 40–47	5X–CC, 7–13
Толща	IV	IV	IA	IB	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IIC	IIC
Глубина, м	0.00	5.78	6.80	9.50	14.85	18.50	22.60	25.00	28.10	29.80	31.90	33.07
Li	42.4	50.7	47.7	32.3	37.7	19.4	34.0	26.4	33.1	11.8	10.7	12.6
Be	0.60	0.69	1.5	1.2	1.6	1.3	1.3	0.87	1.2	0.39	0.99	0.86
Sc	1.1	0.23	16.5	15.3	16.3	11.4	17.5	15.0	12.9	6.6	3.9	4.3
V	21.8	19.1	140	123	143	96.6	155	134	120	55.7	97.4	76.2
Cr	8.6	2.8	77.0	59.5	83.4	44.1	69.9	73.6	69.5	34.9	58.6	36.9
Co	3.5	9.0	20.7	22.2	17.4	17.1	20.8	19.4	17.5	7.8	17.3	7.9
Ni	4.0	6.5	80.6	54.6	64.2	40.2	49.2	42.4	41.6	21.3	36.1	31.3
Cu	4327	6764	209	50.0	49.8	46.3	281	107	11.7	66.2	6.9	15.0
Zn	1037	2547	198	94.0	135.0	71.3	507	2855	179	273	21.6	24.6
Ga	6.1	8.2	16.2	14.7	16.9	9.5	18.4	20.7	16.1	7.5	13.6	8.0
As	4.1	4.0	3.5	10.6	8.3	29.0	21.1	5.0	3.8	5.8	5.9	14.3
Rb	2.5	1.8	71.0	62.4	103.1	32.0	23.3	12.5	0.6	7.2	40.9	2.2
Sr	117	63.7	359	207	81.9	61.0	95.6	105	242	11.7	118	27.9
Y	1.1	0.8	22.1	19.3	19.6	12.9	15.8	12.8	51.4	9.5	16.3	9.2
Zr	3.9	1.8	105	100	109	67.5	111.8	94.2	99.4	50.8	81.2	67.2
Nb	0.20	0.10	9.2	7.8	9.6	5.5	9.3	9.6	7.3	4.0	7.9	5.1
Mo	0.33	2.5	2.6	6.1	8.5	8.9	9.8	13.9	53.3	11.3	1.2	2.4
Ag	3.7	6.0	1.63	0.19	0.46	0.59	0.23	0.07	0.23	0.17	0.06	1.0
Cd	0.90	4.8	0.79	0.18	0.56	0.25	1.2	6.9	0.08	0.32	< ПО	< ПО
Sb	0.63	5.4	1.28	1.2	1.3	2.0	1.4	0.32	0.42	0.61	0.07	0.55
Cs	0.18	0.09	4.3	3.4	11.3	1.9	2.0	0.37	0.024	0.48	1.0	0.12
Ba	713	433	1614	4350	985	254	156	76.2	2.8	136	267	27.0
Hf	0.10	0.05	2.7	2.5	2.7	1.7	2.9	2.4	2.5	1.3	2.0	1.6
Ta	< ПО	< ПО	0.6	0.50	0.63	0.35	0.64	0.61	0.48	0.26	0.48	0.31
W	0.22	0.14	1.0	1.0	1.3	0.38	0.77	0.74	0.57	0.63	0.48	0.35
Tl	0.54	2.1	0.61	1.4	1.3	0.26	13.4	1.9	0.18	0.77	0.21	0.06
Pb	195	762	27.7	11.4	13.9	17.5	13.4	7.3	3.8	27.4	2.9	3.6
Bi	2.3	4.4	0.27	0.14	0.20	0.09	0.19	0.17	0.41	0.07	0.08	0.13
Th	0.08	0.04	5.5	4.5	6.4	3.5	6.0	7.0	4.5	2.5	4.9	2.5
U	1.3	1.5	5.5	2.4	10.2	2.9	7.2	3.7	10.8	3.3	1.8	1.9

Таблица 3. Содержание редкоземельных элементов (мкг/г) в осадках из скважины ODP 1036A

Образец	4042	4043	4044	4045	4046	4047	4048	4049	4050	4051	4052	4053
Керн-секция, интервал (см)	1H-1, 0–10	1H-4, 128–138	1H-5, 80–90	2H-1, 0–10	2H-4, 85–95	2H-7, 0–10	3H-3, 60–70	3H-5, 0–10	3H-7, 10–20	4H-1, 130–140	4H-4, 40–47	5X–CC, 7–13
Толща	IV	IV	IA	IB	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IIC	IIC
Глубина, м	0.00	5.78	6.80	9.50	14.85	18.50	22.60	25.00	28.10	29.80	31.90	33.07
La	0.64	1.07	19.04	15.93	20.14	10.30	13.67	19.56	13.94	10.50	17.63	8.29
Ce	1.12	1.80	37.43	32.46	40.47	22.11	25.57	49.43	43.29	21.49	40.47	17.20
Pr	0.14	0.19	4.51	3.90	4.74	2.65	2.71	6.10	7.45	2.74	4.84	2.04
Nd	0.59	0.71	18.94	16.39	19.39	10.97	10.33	23.42	39.85	11.77	19.19	8.07
Sm	0.17	0.14	4.16	3.81	4.17	2.51	2.29	4.06	15.39	2.60	4.04	1.71
Eu	0.08	0.31	1.00	0.85	0.81	0.35	0.32	0.45	0.71	0.37	0.25	0.08
Gd	0.18	0.15	4.07	3.62	3.89	2.46	2.35	3.12	12.99	2.17	3.45	1.62
Tb	0.03	0.02	0.63	0.56	0.59	0.38	0.42	0.42	1.79	0.32	0.51	0.27
Dy	0.17	0.11	3.90	3.36	3.41	2.35	2.82	2.49	9.58	1.77	2.94	1.66
Ho	0.04	0.02	0.84	0.69	0.73	0.50	0.63	0.51	1.64	0.35	0.60	0.37
Er	0.10	0.06	2.16	1.85	1.89	1.32	1.76	1.35	3.46	0.89	1.54	0.97
Tm	0.01	0.01	0.32	0.28	0.28	0.20	0.28	0.20	0.44	0.13	0.22	0.14
Yb	0.11	0.06	2.04	1.85	1.80	1.30	1.85	1.35	2.56	0.83	1.40	0.92
Lu	0.01	0.01	0.32	0.27	0.27	0.18	0.28	0.21	0.31	0.12	0.21	0.15

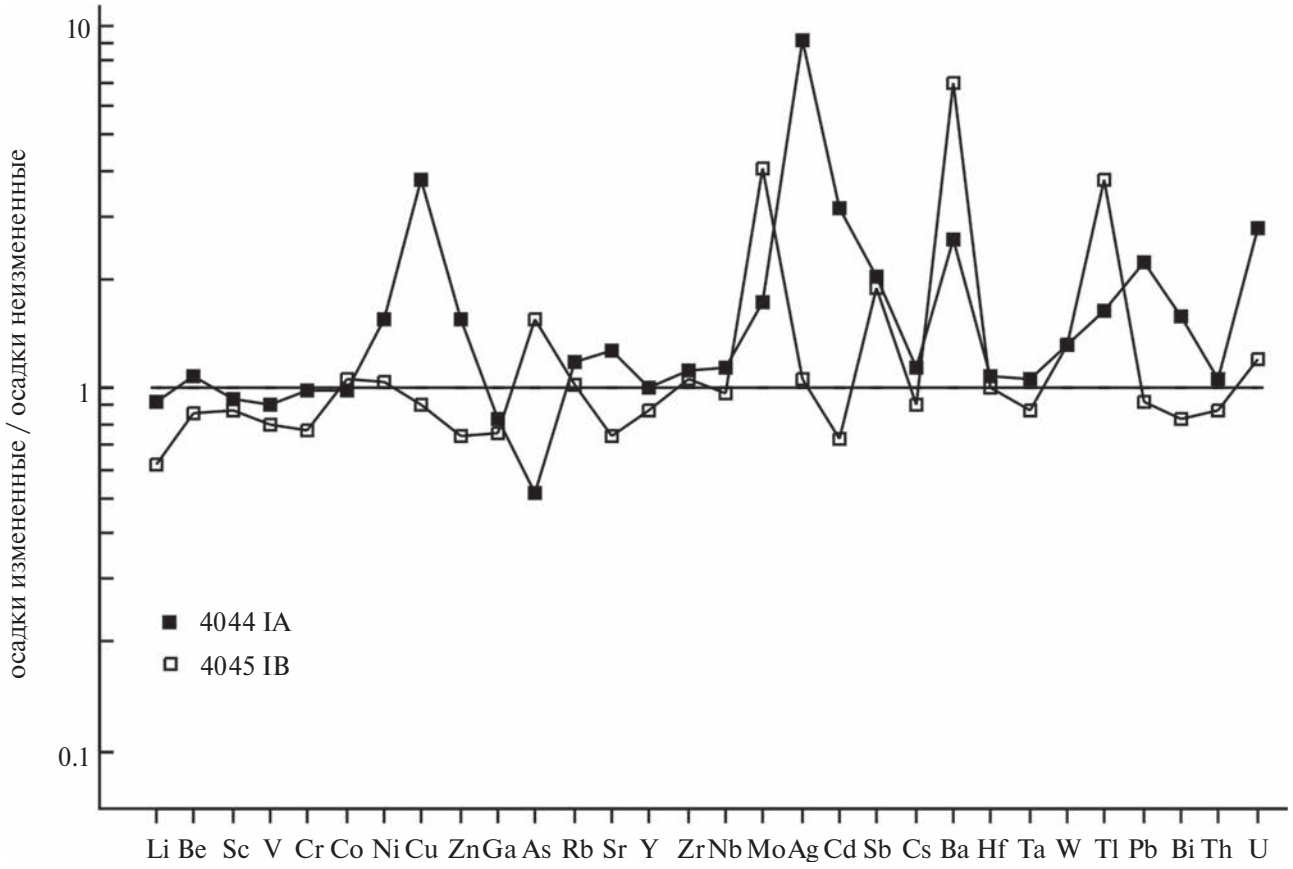

Рис. 3. Содержание микроэлементов в осадках из скважины ODP 1036A (Толщи IA и IB). Здесь и далее на рисунках – нормировано по среднему составу неизмененных осадков из скважин ODP 855A, C, D.

Концентрация большинства микроэлементов в осадках Толщи IA слабо изменилась, в основном в виде увеличения их содержания. Кроме того, остались неподвижными Be, Sc, Cr, Co, Y, Zr, Hf, Ta, Th (рис. 3).

Редкоземельные элементы. Содержание РЗЭ в этих осадках не изменилось по сравнению с их концентрацией в неизмененных фоновых осадках (рис. 4).

Толща IB (обр. 4045)

Макроэлементы. В осадках Толщи IB концентрация макроэлементов близка их содержанию в неизмененных фоновых осадках, за исключением S, ее содержание в обр. 4045 сильно увеличилось (рис. 5).

Микроэлементы. В осадках Толщи IB сильно возросла концентрация Ba (рис. 3).

На среднем уровне интенсивности изменения химического состава осадков увеличилось содержание Mo и Tl (рис. 3). Слабо увеличилось в этих осадках содержание As, Sb и U, а содержание Li, Be, Sc, V, Cr, Cu, Zn, Ga, Sr, Y, Cd, Ta, Bi, Th слабо уменьшилось. Неподвижными остались Co, Ni, Rb, Zr, Nb, Ag, Cs, Hf, Pb.

Редкоземельные элементы. Содержание РЗЭ в этих осадках не изменилось по сравнению с их концентрацией в неизмененных фоновых осадках (рис. 4).

Таким образом, заметные изменения химического состава осадков Толщи 1B проявились только для небольшого количества химических элементов (S, Ba, Mo, Tl).

Толща IC
(верхняя половина, образцы 4046 и 4047)

Макроэлементы. В этих осадках сильно уменьшилась концентрация Ca (рис. 6).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в образцах 4046 и 4047 увеличилось содержание S и уменьшилось содержание Na. В обр. 4047 уменьшилась концентрация K (рис. 6).

Слабо увеличилось содержание Mg в образцах 4046 и 4047. Слабо увеличилось содержание Mn в обр. 4047 и P в обр. 4046. Слабо уменьшилось содержание Fe в образцах 4046 и 4047 и Mn в обр. 4046. В образцах 4046 и 4047 содержание Si сохранилось без изменения. В обр. 4046 неподвижными остались еще Ti, Al, K (рис. 6).

Микроэлементы. Сильно увеличилось содержание Mo в образцах 4046 и 4047, Ag в обр. 4047 и U в обр. 4046 (рис. 7).

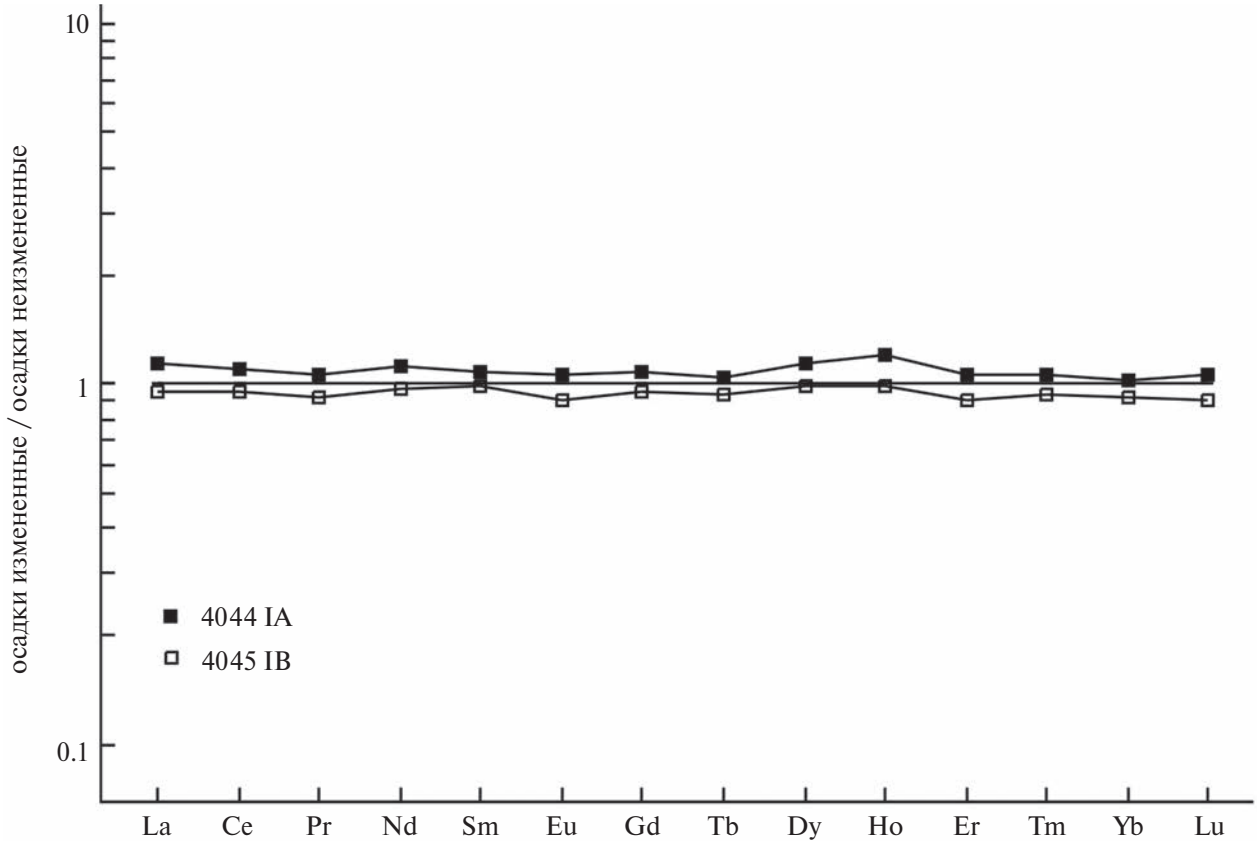

Рис. 4. Содержание редкоземельных элементов в осадках из скважины ODP 1036A (Толщи IA и IB).

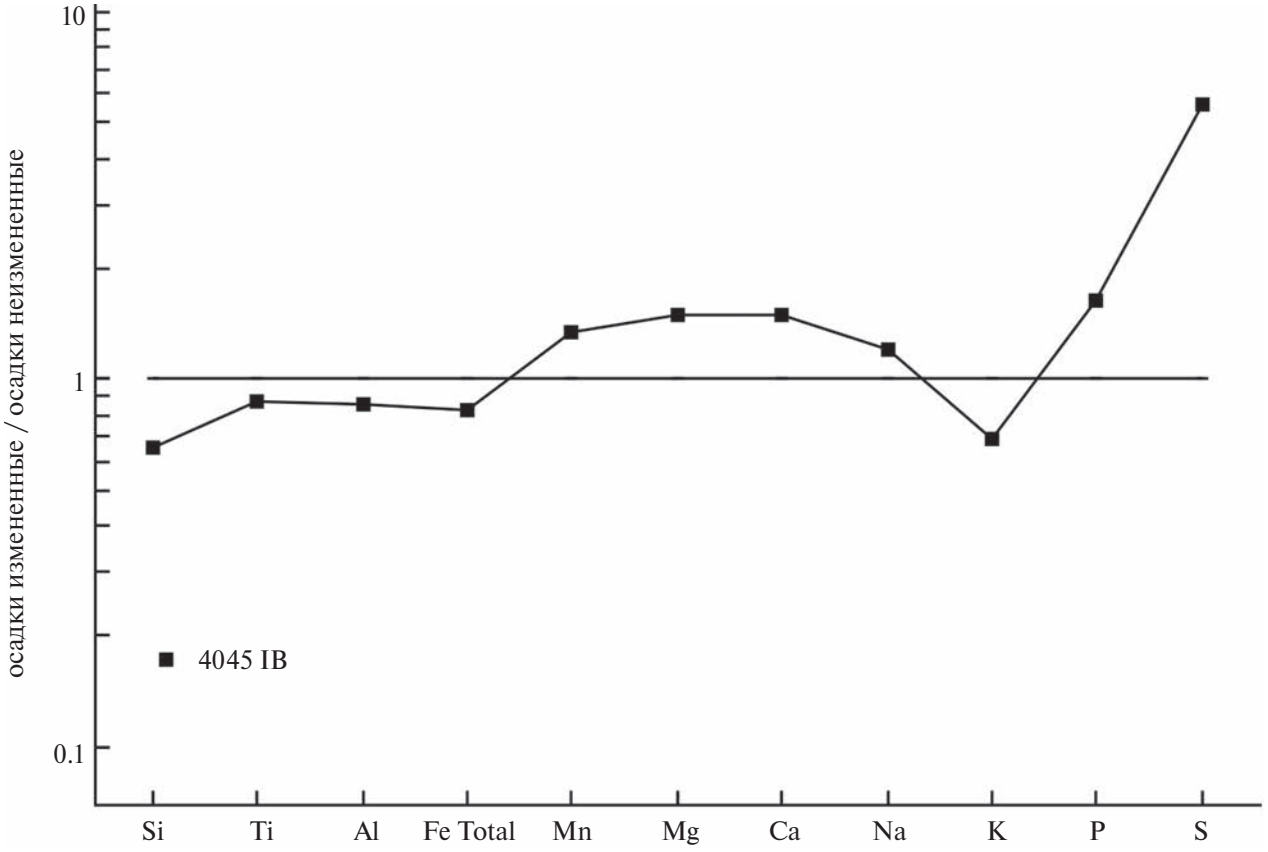

Рис. 5. Содержание макроэлементов в осадках из скважины ODP 1036A (Толща IB).

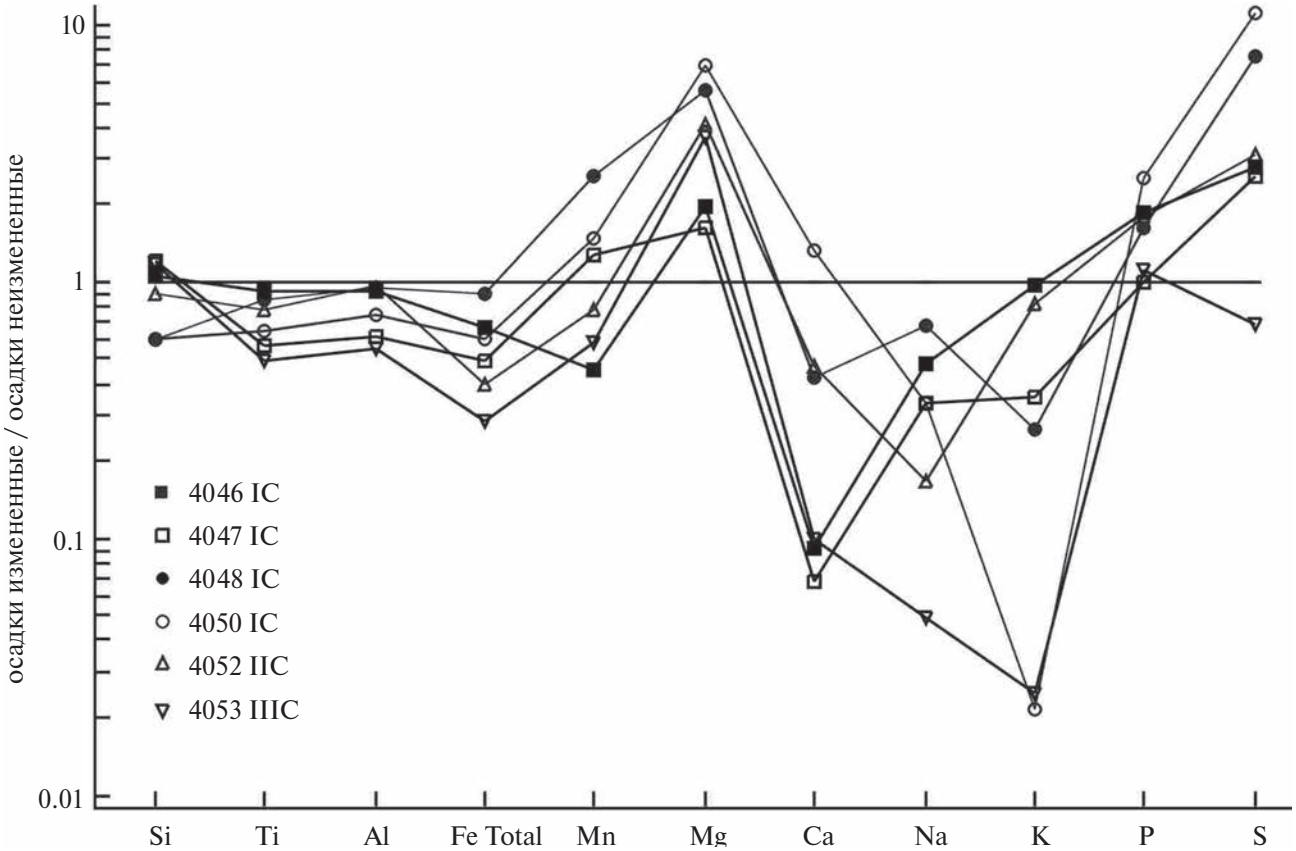

Рис. 6. Содержание макроэлементов в гидротермально измененных осадках из скважины ODP 1036A (Толщи IC и IIC).

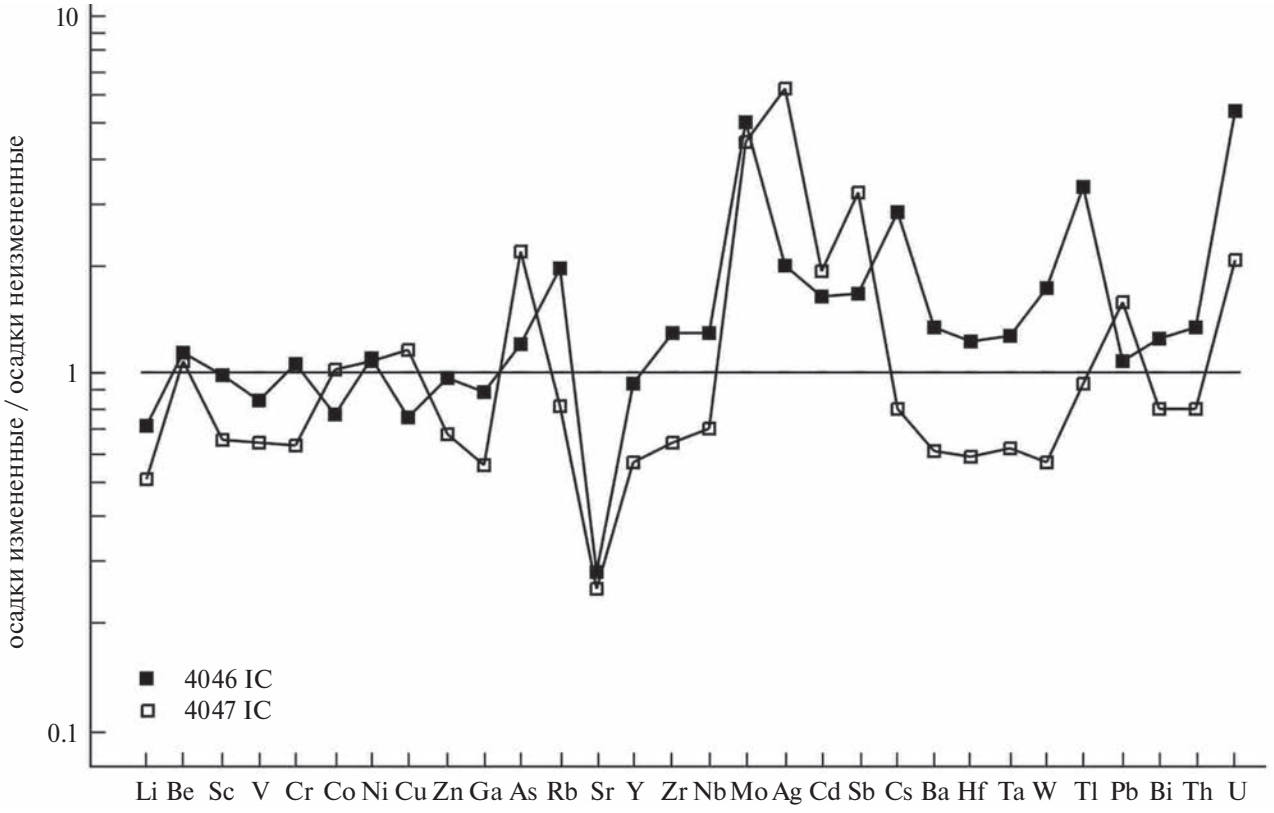

Рис. 7. Содержание микроэлементов в гидротермально измененных осадках верхней половины Толщи IC из скважины ODP 1036A.

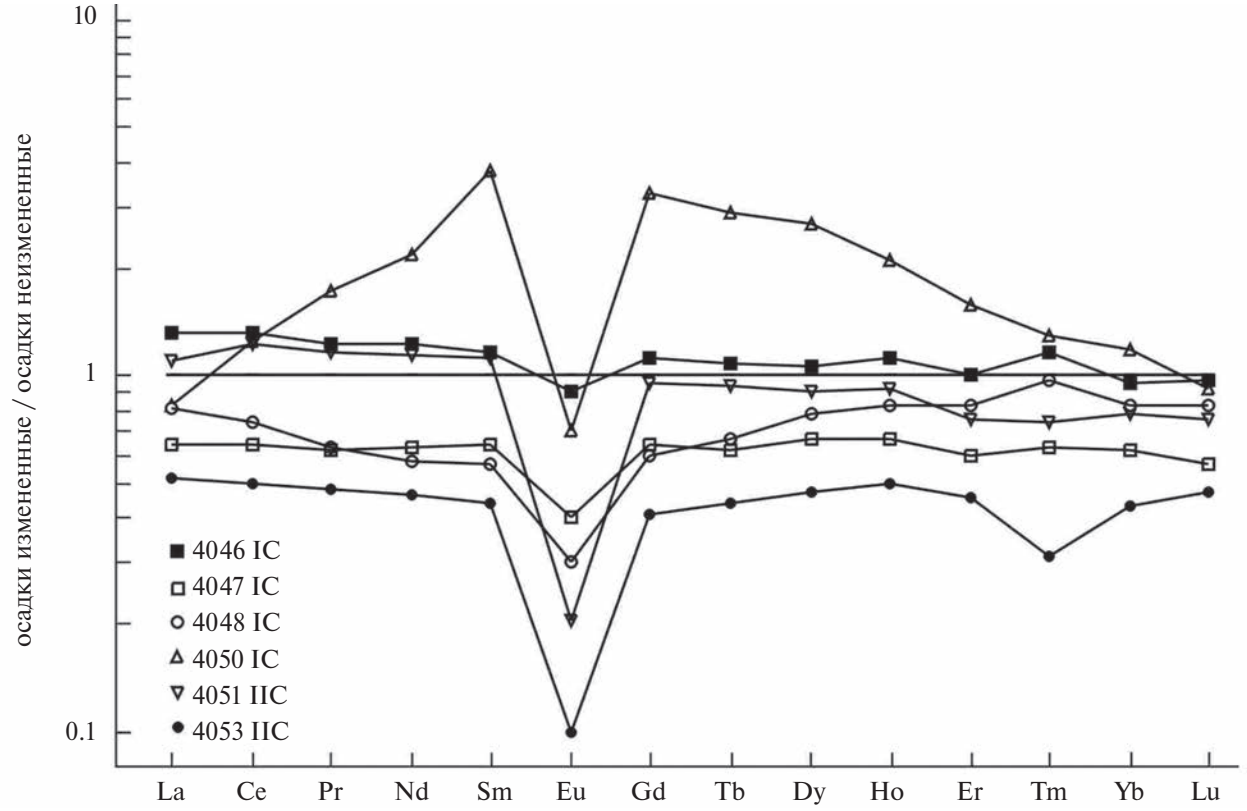

Рис. 8. Содержание редкоземельных элементов в гидротермально измененных осадках из скважины ODP 1036A (Толщи IC и IIC).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в образцах 4046 и 4047 уменьшилось содержание Sr. В обр. 4046 увеличилась концентрация Cs и Tl, а в обр. 4047 увеличилось содержание As, Sb (рис. 7)

Слабо увеличилось содержание As, Rb, Zr, Nb, Ag, Cd, Sb, Ba, Hf, Ta, W, Bi, Th в обр. 4046 и слабо уменьшилась в нем концентрация Li, V, Co, Cu, Ga. В обр. 4047 слабо увеличилось содержание Cu, Cd, Pb, U и слабо уменьшилась концентрация Li, Sc, V, Cr, Zn, Ga, Rb, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Bi, Th. Без изменения содержания сохранились Be и Ni в образцах 4046 и 4047, Sc, Cr, Zn, Y, Pb в обр. 4046, Co и Tl в обр. 4047 (рис. 7).

Редкоземельные элементы. В обр. 4046 содержание РЗЭ практически не изменилось по сравнению с их содержанием в неизмененных фоновых осадках (рис. 8) и в осадках Толщи IA и Толщи IB (рис. 4). В обр. 4047 проявилось слабое уменьшение концентрации всех РЗЭ, за исключением Eu. Его содержание уменьшилось на среднем уровне (рис. 8).

Толща IC (нижняя половина, образцы 4048 и 4850)

Макроэлементы. В этих осадках сильно увеличилось содержание Mg и S, а в обр. 4050 сильно уменьшилась концентрация K (рис. 6).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в обр. 4048 увеличилось содержание Mn и в обр. 4050 увеличилось содержание P. В обр. 4048 уменьшилась концентрация Ca и K (рис. 6). Слабо увеличилось содержание Mn и Ca в обр. 4050. Слабо уменьшилось содержание Si в образцах 4048 и 4050, Ti, Al, Fe в обр. 4050 и Na в обр. 4048.

Не изменилась концентрация Ti, Al, Fe в обр. 4048 (рис. 6).

Микроэлементы. В осадках нижней половины Толщи IC сильно увеличилась концентрация Mo и U в образцах 4048 и 4050, и Cu, Zn, Cd, Tl в обр. 4048. В обр. 4050 сильно уменьшилось содержание Rb, Cs, Ba (рис. 9).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в образцах 4048 и 4850 в обр. 4048 увеличилась концентрация Ag, As и Sb, в обр. 4050 – Bi. Содержание Cu, Cd, Pb уменьшилось в обр. 4050, и Sr, Ba в обр. 4048 (рис. 9).

Слабо увеличилось содержание Zn, Y в обр. 4050, Pb в обр. 4048. Слабо уменьшилась концентрация Li в образцах 4048 и 4850, Rb, Y, Cs в обр. 4048, Be, Sc, V, As, Nb, Hf, Ta, W, Tl в обр. 4050. Не изменилась концентрация Be, Sc, V, Nb, Hf, Ta, W, Bi в обр. 4048, Sb в обр. 4050, Cr, Co, Ni, Ga, Zr, Nb, Th в образцах 4048 и 4050 (рис. 9).

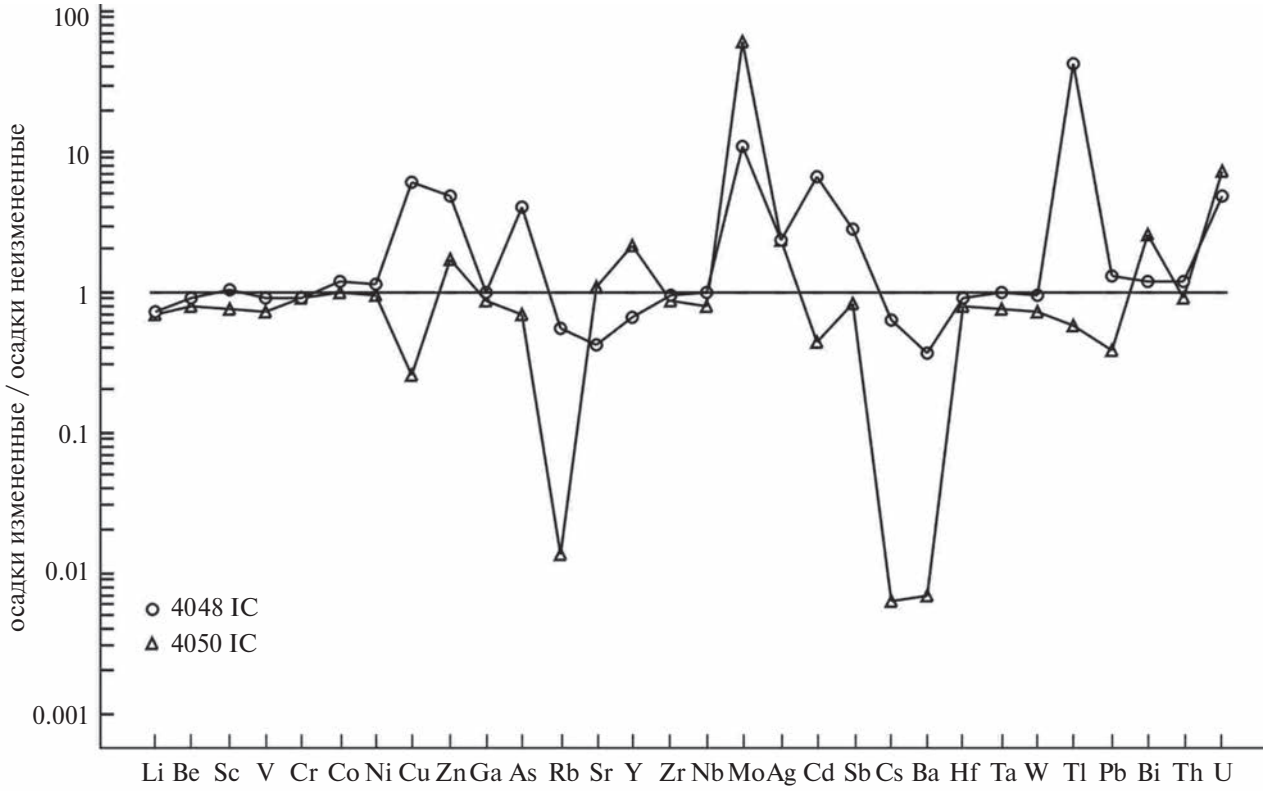

Рис. 9. Содержание микроэлементов в гидротермально измененных осадках нижней половины Толщи IC из скважины ODP 1036A.

Редкоземельные элементы. Содержание РЗЭ в обр. 4048 уменьшилось слабо, за исключением содержания Eu, примерно так же, как в обр. 4047 из осадков верхней половины Толщи IC. В обр. 4050 произошло изменение содержания РЗЭ, в основном увеличилось их содержание, которое не вписывается в общую закономерность постепенного уменьшения концентрации РЗЭ (сверху-вниз) в разрезе осадков из скважины 1036A, начиная от обр. 4048 и до обр. 4053, за исключением обр. 4052 (рис. 8).

Толща IIC (образцы 4052 и 4053)

Макроэлементы. В этих осадках так же, как в осадках из нижней половины Толщи IC, сильно увеличилось содержание Mg. Сильно уменьшилось содержание Ca, Na, K в обр. 4053 и Na в обр. 4052. Сильное уменьшение концентрации K в обр. 4053 по своей интенсивности одинаковое с уменьшением его концентрации в обр. 4050 из нижней половины Толщи IC (рис. 6).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в обр. 4052 увеличилось содержание S и уменьшилось содержание Ca. В образцах 4052 и 4053 уменьшилась концентрация Fe (рис. 6).

Слабо уменьшилась концентрация Ti и Mn в образцах 4052 и 4053, Si и K в обр. 4052, Al и S в обр. 4053. В обр. 4052 слабо увеличилось содержание P. Сохранилось без изменения содержание Al в обр. 4052, а в обр. 4053 – Si и P (рис. 6).

В измененных осадках Толщи IIC содержание почти всех макроэлементов уменьшилось, включая слабое их уменьшение (рис. 6).

Микроэлементы. Сильно увеличилось содержание Ag и сильно уменьшилась концентрация Rb, Sr, Cs, Ba в обр. 4053, а также Sb в обр. 4052 (рис. 10).

На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков в обр. 4052 увеличилась концентрация Mo и уменьшилась концентрация Sr, U. В обр. 4053 уменьшилось содержание V, Co, Ga, Y, W, Tl. В образцах 4052 и 4053 уменьшилось содержание Li, Sc, Cu, Zn, Cd, Pb (рис. 10).

Слабо увеличилась концентрация Co, Ni, Nb, Th в обр. 4052 и Mo в обр. 4053. Содержание остальных микроэлементов слабо уменьшилось или осталось без изменения (рис. 10).

В осадках Толщи IIC концентрация большого количества микроэлементов уменьшилась.

Редкоземельные элементы. В обр. 4053 наиболее заметно уменьшилось содержание РЗЭ в осадках из скважины 1036A, что соответствует тенденции постепенного сокращения их концентрации в осадках в Толще IC и Толще IIC с увеличением глубины.

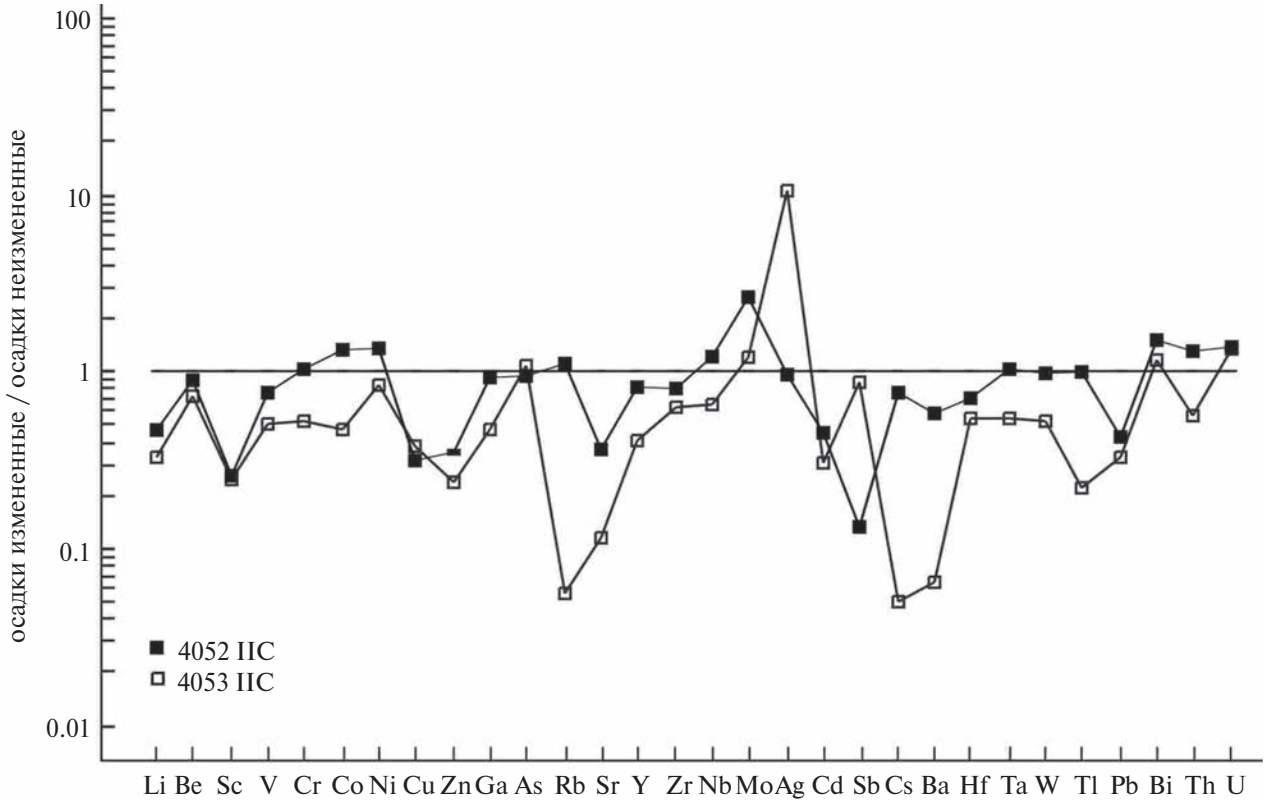

Рис. 10. Содержание микроэлементов в гидротермально измененных осадках Толщи IIC из скважины ODP 1036A.

В то же время, эта тенденция нарушена в обр. 4052, в котором содержание РЗЭ практически не отличается от их содержания в фоновых осадках и от их концентрации в осадках верхней части разреза (обр. 4046), за исключением содержания Eu, концентрация которого сильно сократилась (рис. 8).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Температура в скважине 1036A. *Температурный градиент*. Температурный градиент в скважине 1036A такой же, как и в скважине 858B, и составляет 10°C/м [5, 9]. Это заключение основано на данных по распределению температуры в этих скважинах, пробуренных до глубины 38.50 м и 38.60 м в центре одной гидротермальной системы, на расстоянии 75 м друг от друга, рядом с гидротермальными источниками (рис. 1). Прежде всего, замеренные инструментально температуры в этих скважинах на одинаковых глубинах равны. В скважине 1036A на глубине 20 м замерена температура 200°C [8], в скважине 858B на глубине 19.5 м замерена температура 197°C [6]. Кроме того, по данным [13] в скважине 1036A на глубине 21.8 м температура 206°C и на глубине 27.8 м – 268°C. Эта разница в температурах 62°C при разнице в 6 м глубины их замера в скважине соответствует температурному градиенту 10°C/м.

Температура в Толщах IA и IB (6.10–10.04 м). В верхней части скважины 1036A, в Толщах IA и IB, температура не была определена. В то же время, в скважине 858B практически в таком же интервале глубин 1.97–10.41 м с неизмененными терригенными осадками температура составляет ~17°C [3]. Учитывая одинаковый в осадках из этих скважин терригенный минеральный и сохранившийся неизмененный химический составы осадков, можно считать, что эта температура ~17°C характерна и для Толщи IA в скважине 1036A.

В Толще IB в осадках проявлено небольшое изменение их химического состава, поэтому в ней температура может составлять ~50–70°C.

Верхняя половина Толщи IC (10.04–20 м). Температура в верхней половине Толщи IC не была определена. В то же время, в скважине 858B на глубине 16 м рассчитанная температура составляет ~112°C [3]. С учетом того, что в скважине 1036A температурный градиент такой же, как в скважине 858B, это значение температуры можно отнести и к верхней половине Толщи IC.

Нижняя половина Толщи IC (20–30.70 м). В скважине 1036A на глубине 21.8 м температура составляет 206°C и на глубине 27.8 м определена температура 268°C [13]. Температура в нижней половине Толщи IC находится в пределах 200–270°C.

Толща IIC (30.70–38.50 м). В скважине 1036A, ниже глубины 27.8 м, нет сведений о температуре. В то же время, в осадках из этой скважины на глубине 37.64 м новообразованные глинистые минералы представлены хлоритом [13]. Температура образования хлорита, по аналогии с температурой его образования в скважинах, пробуренных в спрединговом рифте на гидротермальном поле Рейкьянес в Исландии [10–12], может составлять 270°C и выше. В осадках из скважины 858B, пробуренной до глубины 38.60 м, в нижней части которой установлен также новообразованный хорошо окристаллизованный хлорит [3, 13], температура его образования от 270°C до 320–330°C [3, 5, 9].

Степень изменения химического состава осадков при низкой температуре. *Толща IA (6.10–9.20 м)*. Влияния гидротермального флюида на химический состав осадков Толщи IA не произошло. При температуре ~17°C содержание большинства химических элементов в этих осадках или слабо увеличилось или не изменилось по сравнению с их содержанием в фоновых неизмененных терригенных осадках (рисунки 3, 4). Заметное увеличение в этих осадках концентрации Ag, Cu, Cd, Ba, Pb, U связано с обломками обрушения сульфидной трубы “черного курильщика”, около которого пробурена скважина 1036A. Из этих обломков рудной трубы состоит толща IV, они встречены также в Толще IA. Не исключено, что слабое увеличение в осадках Толщи IA содержания Ni, Zn, Mo, Sb, Cs, W, Tl, Bi также связано с примесью в них этих обломков.

Толща IB (9.20–10.04 м). При температуре ~50–70°C влияние гидротермального флюида на изменение химического состава этих осадков было слабое, оно привело к заметному изменению концентрации небольшого количества химических элементов S, Mo, Ba и Tl (рисунки 3, 5). Кроме того, влияние гидротермального раствора на изменение химического состава этих осадков, по-видимому, проявилось в слабом уменьшении содержания большинства микроэлементов, в отличие от осадков Толщи IA, в которых слабо уменьшилось содержание всего нескольких микроэлементов (рис. 3). В осадках Толщи IB не изменилось содержание редкоземельных элементов по сравнению с их содержанием в фоновых неизмененных терригенных осадках, как и в осадках Толщи IA (рис. 4).

Низкие температуры в Толщах IA и IB можно объяснить проникновением холодной морской воды в эти осадки.

Изменение химического состава осадков при высокой температуре. Основное изменение химического состава осадков из скважины 1036A на уровне сильной и средней интенсивности увеличения/уменьшения содержания химических элементов произошло в Толщах IC и IIC в системе взаимодействия гидротермальный флюид–порода. Соответственно, рассмотрение изменения химического состава осадков при быстром увеличении температуры вниз по разрезу осадков из скважины 1036A целесообразно было провести для Толщ IC и IIC.

Толща IC (верхняя половина, 10–20 м). При температуре ~112°C в осадках сильно увеличилась концентрация Mo, Ag, U и сильно уменьшилось содержание Ca. На уровне средней интенсивности изменения химического состава осадков увеличилось содержание S, Cs, Tl, As, Sb и сократилась в них концентрация Na, K, Sr, Eu (табл. 4). Таким образом, при этой температуре существенно изменилось содержание только небольшого количества химических элементов.

Относительно низкая температура в осадках Толщи IC также связана с проникновением в них морской воды, но уже с меньшим охлаждающим воздействием, чем на вышележащие осадки (Толщи IA и IB), из-за постепенного ее разогревания при миграции вниз по разрезу осадков.

Толща IC (нижняя половина, 20–30.70 м). При температуре до 200–270°C произошло в основном сильное и среднего уровня увеличение содержания большого количества химических элементов в осадках. Сильно увеличилась концентрация Mg, S, U, Mo, Cu, Zn, Cd, Tl. На среднем уровне интенсивности изменения химического состава осадков увеличилось содержание Mn, P, Ag, As, Sb, Bi, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho (табл. 4). Соответственно этими элементами обеднел раствор, взаимодействующий с осадками. Концентрация только небольшого количества химических элементов Ca, Rb, Sr, Sc, Ba, Cu уменьшилась

Таблица 4. Соотношение между температурой и изменением содержания химических элементов в гидротермально измененных осадках из скважины ODP 1036A по сравнению с их содержанием в исходных неизмененных осадках из скважины ODP 1037B

Толща	Образец	Глубина отбора образца в скважине, м	Температура	Химические элементы, содержание которых сильно увеличилось (в 4 раза и больше)	Химические элементы, содержание которых увеличилось в пределах от 2 до 4 раз	Химические элементы, содержание которых сильно уменьшилось (в 4 раза и больше)	Химические элементы, содержание которых уменьшилось в пределах от 2 до 4 раз
IC (верхняя половина: 10.04–20 м)	4046	14.85	~112°C	Mo, U	S Cs, Tl	Ca	Na Sr
	4047	18.50		Mo, Ag	S As, Sb	Ca	Na, K Sr Eu
IC (нижняя половина: 20–30.70 м)	4048	22.60	200–270°C	Mg, S U, Cu, Zn, Mo, Cd, Tl	Mn Ag, As, Sb		Ca, K Sr, Ba Eu
	4050	28.10		Mg, S Mo, U	P Ag, Bi Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho	K Rb, Cs, Ba	Cu
IIC 30.70–38.5 м	4052	31.90	270–330°C	Mg	S Mo	Na, Sb	Fe, Ca, Li, Sc, Cu, Zn, Pb, Sr Eu
	4053	33.07		Mg Ag		Ca, Na, K Rb, Sr, Cs, Ba Eu	Fe Li, Sc, Cu, Zn, Pb, V, Co, Ga, Y, W, Tl Nd, Sm, Gd, Tb, Er, Tm, Yb, Lu

в осадках (табл. 4), что сопровождалось слабым обогащением раствора этими элементами.

Толща IIC (30.70–38.50 м). При температуре 270–330°C в этих осадках произошло сильное уменьшение содержания большинства элементов. В обр. 4052 сильно сократилась концентрация Na, Sb и на среднем уровне интенсивности изменения химического состава осадков уменьшилось содержание Fe, Ca, Na, Li, Sc, Cu, Zn, Cd, Pb, Eu. В обр. 4053 количество химических элементов, содержание которых уменьшилось, существенно выросло по сравнению с обр. 4052. В обр. 4053 сильно уменьшилось содержание Ca, Na, K, Rb, Sr, Cs, Ba, Eu. В нем на среднем уровне интенсивности изменения химического состава осадков уменьшилось содержание Fe, Li, Sc, Cu, Zn, Cd, Pb, V, Co, Ga, Y, W, Tl, Nd, Sm, Gd, Tb, Er, Tm, Yb, Lu (табл. 4).

Изменение концентрации химических элементов в осадках Толщи IIC принципиально отличается от изменения содержания химических элементов в осадках нижней половины Толщи IC. В осадках нижней половины Толщи IC значительно больше привнесенных химических элементов, чем вынесенных, что указывает на уменьшение содержания этих элементов в гидротермальном флюиде. В осадках Толщи IIC, напротив, привнесенных химических элементов всего четыре и очень большое количество вынесенных элементов, что привело к существенному обогащению этими элементами гидротермального флюида в процессе взаимодействия раствор–порода.

Преобразование химического состава осадков, находящихся в осадочном покрове ниже глубины 38.50 м. Ниже глубины 38.50 м, на которой остановлено бурение скважины 1036A, из-за большой температуры в ней, в осадочном чехле, мощность которого в районе гидротермального поля составляет 250–300 м, температура может достигать 400°C и выше в соответствии с высоким температурным градиентом (10°C/м) в этой скважине. Можно предположить, что при таких температурах в этой преобладающей части разреза плейстоценовых осадков осадочного покрова в процессе их взаимодействия с гидротермальным флюидом происходит сильное уменьшение содержания большинства химических элементов так же, как в осадках Толщи IIC (30.70–38.50 м), или еще более интенсивное.

Соответственно, при взаимодействии высокотемпературного гидротермального флюида с осадками, прилегающими к каналу подъема и разгрузки раствора в центре гидротермальной системы и находящимися в осадочном покрове в интервале от 30.70 м до 250–300 м, существенное уменьшение содержания химических элементов в осадках оказывает основное влияние на формирование состава гидротермального рудообразующего флюида. Гидротермальный флюид при взаимодействии с этими осадками обогащается большим количеством химических элементов.

Влияние латеральных потоков гидротермальных растворов и морской воды на изменение химического состава осадков. Существование латеральных потоков растворов и морской воды в океанских гидротермальных системах в настоящее время не вызывает сомнений. Эти потоки характерны также для зон, прилегающих к центральным каналам подъема и разгрузки гидротермального флюида.

В скважине 858B, которая близка по своему местоположению в центральной части гидротермальной системы скважине 1036A, показано, что карбонатные конкреции формируются в условиях проникновения в осадки латеральных потоков морской воды [5, 9]. В скважине 1036A в осадках Толщ IB, IC, IIC присутствуют карбонатные конкреции. В осадках Толщ IC и IIC присутствуют также ангидритовые конкреции, которые формируются при смешении горячего богатого кальцием флюида и холодной богатой сульфатом морской воды или при нагревании морской воды [4, 8, 14].

Существованием латеральных потоков растворов и морской воды можно объяснить пестроту в изменении химического состава осадков в пределах Толщ IC и IIC (рисунки 6–10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения химического состава верхнеплейстоценовых осадков из скважины 1036A, пробуренной в центре высокотемпературной гидротермальной системы, на гидротермальном поле “Мертвая собака”, в зоне, прилегающей к каналу подъема и разгрузки гидротермального флюида и его взаимодействия с осадками, установлено, что наиболее существенные изменения химического состава осадков произошли в интервале 20–30.70 м (нижняя половина Толщи IC) при температуре 200–270°C и в самом низу скважины, в интервале 30.70–38.5 м (Толща IIC), при температуре 270–330°C. В этих интервалах изменение химического состава осадков проявилось по-разному. В интервале 20–30.70 м увеличилась концентрация большого количества химических

элементов: Mg, S, Mn, P, Mo, U, Cu, Zn, As, Cd, Tl, Ag, Sb, Bi, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho и соответственно произошло обеднение гидротермального флюида этими элементами. В интервале 30.70–38.5 м, напротив, концентрация большинства химических элементов уменьшилась: Fe, Ca, Na, K, Sb, Rb, Sr, Cs, Ba, Li, Sc, Cu, Zn, Cd, Pb, Sr, V, Co, Ga, Y, W, Tl, РЗЭ, что привело к существенному обогащению гидротермального флюида этими элементами.

На основании высокого температурного градиента (10° С/м) в высокотемпературных условиях от 270–330°С до 400°С и выше, при взаимодействии раствор–осадки, в осадочном покрове мощностью 250–300 м, начиная от глубины 30.70 м и до его основания, может происходить интенсивное обеднение осадков многими химическими элементами. Соответственно, это уменьшение содержания химических элементов оказывает основное влияние на формирование состава гидротермального флюида, мигрирующего через осадочный покров в канале его подъема и разгрузки.

Полученные результаты исследования изменения химического состава осадков из скважины 1036А являются базовыми при изучении преобразования осадков, прилегающих к каналам подъема и разгрузки на дне гидротермального флюида в центрах циркуляционных долгоживущих высокотемпературных гидротермальных систем в спрединговых океанских рифтах, перекрытых осадками большой мощности.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Г.Н. Новикову за подготовку образцов пород для анализа их химического состава.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного плана научно-исследовательских работ (Геологический институт Российской Академии наук) по теме № 122011800645-0.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карандашев В.К., Хвостиков В.А., Носенко С.Ю., Бурмий Ж.П.* Использование высокообогащенных стабильных изотопов в массовом анализе образцов горных пород, грунтов, почв и донных отложений методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 7. С. 6–15.
2. *Курносов В.Б., Коновалов Ю.И., Галин К.Р.* Химический состав осадков и его изменения в центре современной гидротермальной системы в Срединной Долине океанического хребта Хуан де Фука, скважина 858B ODP // Литология и полезные ископаемые. 2023. № 1. С. 50–60.
3. *Сахаров Б.А., Курносов В.*Б. Особенности образования глинистых минералов в осадках из центра гидротермальной системы, скважина 858B, хребет Хуан де Фука // Литология и полезные ископаемые. 2022. № 2. С. 181–204.
4. *Bischoff J.L., Seyfried W.E.* Hydrothermal chemistry of seawater from 25° to 350°C // American Journal of Science. 1978. V. 278. P. 838–860.
5. *Buatier M.D., Karpoff A-M., Boni M, et al.* Mineralogical and petrographic records of sediment-fluid interaction in the sedimentary sequence at Middle Valley, Juan de Fuca Ridge, Leg 139 // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 1994. V. 139. P. 133–154.
6. *Davis E.E., Mottl M.J., Fisher A.T. et al.* Init. Repts. 1992. V. 139. College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1026 p.
7. *Davis E.E., Villinger H.* Tectonic and thermal structure of the Middle Valley sedimented rift, northern Juan de Fuca Ridge // Init. Repts. 1992. V. 139. College Station, TX (Ocean Drilling Program). P. 9–41.
8. *Fouquet Y., Zierenberg R.A., Miller D.J. et al.* Proc. ODP. Init Repts. 1998. V. 169. College Station, TX (Ocean Drilling Program).
9. *Frü-Green G.L., McKenzie J.A., Boni M. et al.* Stable isotope and geochemical record of convective hydrothermal circulation in the sedimentary sequence of Middle Valley, Juan de Fuca Ridge, Leg 139 // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 1994. V. 139. P. 291–306.
10. *Kristmannsdottir H.* Clay minerals formed by hydrothermal alteration of basaltic rocks in Iceland geothermal fields // Geol. Fören Stockholm. 1975. V. 97. P. 289–292.
11. *Kristmanndottir H.* Types of clay minerals in hydrothermally altered basaltic rocks, Reykjanes, Iceland // Jökull. 1976. V. 26. P. 30–39.
12. *Kristmannsdottir H.* Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100–300°C // Clay Conf., 1978 / Mortland M.M., Farmer V.C. (eds). Amsterdam: Elsevier, 1979. P. 359–367.
13. *Lackschewitz K.S.б Singer A.* Formation and transformation of clay minerals in the hydrothermal deposits of Middle Valley, Juan de Fuca Ridge, ODP Leg 169 // Economic Geology. 2000. V. 95. P. 361–389.
14. *Seyfried W.E., Bischoff J.L.* Low temperature basalt alteration by seawater: An experimental study at 70°C and 150°C // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1979. V.43. № 12. P. 1937–1947.
15. *Zierenberg R.A., Fouquet Y., Miller D.J. et al.* Proc. ODP, Sci. Results. 2000. V. 169. College Station TX (Ocean Drilling Program).

CHANGES IN THE COMPOSITION OF UPPER PLEISTOCENE SEDIMENTS IN THE CENTER OF THE ACTIVE HYDROTHERMAL SYSTEM (MIDDLE VALLEY, JUAN DE FUCA RIDGE, PACIFIC OCEAN)

V. B. Kurnosov*, Yu. I. Konovalov, K. R. Galin**

Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

** e-mail: vic-kurnosov@rambler.ru*

*** e-mail: konsgalin@yandex.ru*

The article presents the results of studying the changeы in the chemical composition of the Upper Pleistocene sediments from the Hole ODP 1036A, drilled in the Middle Valley of the Juan de Fuca oceanic ridge at the Dead Dog hydrothermal field to a depth of 38.50 m, 9 m from the “black smoker” with a temperature of 268°C. The most significant changes in sediment chemistry occurred in the lower intervals of the hole. In the interval 20–30.70 m, the concentration of a large number of chemical elements increased and, accordingly, the hydrothermal fluid was depleted of these elements. In the interval 30.70–38.5 m, on the contrary, the concentration of most chemical elements decreased, which led to a significant enrichment of hydrothermal fluid with these elements.

Keywords: hydrothermal system, Juan de Fuca oceanic ridge, hydrothermal alteration of sediments, water-rock interaction, deep sea drilling

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 678–689

МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.435.3

РИТМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ПЕСЧАНОГО БЕРЕГА И САМООРГАНИЗАЦИЯ РЕЛЬЕФА

©2024 г. И. О. Леонтьев*

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

**e-mail: igor.leontiev@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.10.2023 г.
После доработки 14.12.2023 г.
Принята к публикации 28.12.2023 г.

Феномен ритмических форм рельефа в береговой зоне (пляжевые фестоны, песчаные волны, косы, подводные валы) рассматривается как результат самоорганизации рельефа при установлении положительной обратной связи между транспортом наносов и морфологией. Показано, что динамика контура и профиля берега может быть описана в терминах уравнения диффузии, которое допускает как затухание, так и рост возмущений рельефа. Характеризуются условия, при которых включается механизм самоорганизации и возникающие возмущения растут со временем. Ритмические структуры контура берега традиционно связываются с волнениями, распространяющимися под большим углом относительно береговой нормали. Показано однако, что самоорганизация фестонов и мегафестонов реализуется и при нормальном к берегу волнении благодаря развитию циркуляционных ячеек в прибойной зоне. Обосновывается вывод, что формирование подводных валов при определенных условиях также обусловливается механизмом самоорганизации. Полученные результаты помогают интерпретировать имеющиеся данные наблюдений в отношении эволюции мультиваловых систем.

Ключевые слова: морской берег, самоорганизация рельефа, ритмические формы контура и профиля берега, транспорт наносов

DOI: 10.31857/S0030157424040113, **EDN:** PRCRZD

ВВЕДЕНИЕ

Морфология песчаного аккумулятивного берега характеризуется наличием волнообразных форм рельефа разного масштаба, которые прослеживаются как в очертаниях контура берега, так и в рисунке профиля дна. К ритмическим структурам береговой линии относятся, например, пляжевые фестоны, мегафестоны, вдольбереговые песчаные волны и песчаные косы, а примером волнообразных форм профиля берега служат системы параллельных берегу подводных валов. На галечных берегах ритмические формы могут быть представлены пляжевыми фестонами [2].

Для объяснения ритмичности прибрежной топографии предложен целый ряд гипотез и теорий. Одна из существующих точек зрения исходит из того, что воздействующая на берег гидродинамика обладает собственным пространственным ритмом, который находит отражение в рельефе. Предполагается, например, что ритмический рисунок контура берега связан с влиянием краевых волн (edge waves) [12], а системы подводных валов рассматриваются как результат действия инфрагравитационных колебаний той или иной природы [24]. Показано, в частности, что флуктуации скорости диссипации энергии, связанные с группами волн, хорошо коррелируют с шагом мультиваловых систем [3].

Однако наибольшее признание получила идея о самоорганизации прибрежной морфологии как нелинейной системы с положительной обратной связью между транспортом наносов и эволюционирующим рельефом дна [11, 16, 19, 20]. Согласно этой концепции, пространственный ритм морфологии не обязательно совпадает с ритмом вынуждающих сил, а вырабатывается в процессе взаимодействия гидродинамики и рельефа. При подходящих условиях небольшое возмущение рельефа может расти со временем, вызывая пространственные осцилляции контура и профиля берега. Гидродинамическая неустойчивость в условиях первоначально плоского берега проявляется, например, в развитии циркуляционных ячеек в прибойной зоне [23, 29].

Концепция самоорганизации рельефа нашла отражение в целом ряде морфодинамических моделей [6, 9, 10, 18, 21, 25, 30], в основе которых лежит принцип сохранения массы,

связывающий изменения глубин с градиентами расхода наносов:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}, \qquad (1)$$

где h – глубина, t – время, оси OX и OY направлены соответственно по нормали и вдоль генерального направления береговой линии (рис. 1а), q_x и q_y – поперечный и продольный расходы наносов на единицу ширины ($м^3м^{-1}с^{-1}$). Если профиль берега близок к равновесию и в ходе эволюции сохраняет свои свойства [15], то из (1) следует уравнение эволюции контура берега [5, 31]:

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = \frac{\partial Q_y / \partial y - \overline{q_x}}{h_* + z_b}, \qquad (2)$$

где x_0 – положение береговой линии, $Q_y = \int_0^{l_*} q_y dx$ – интегральный вдольбереговой расход наносов, $\overline{q_x}$ – результирующий поперечный расход, а l_* – длина активной области профиля или расстояние между глубиной замыкания h_* (где штормовые деформации дна пренебрежимо малы) и максимальным возвышением пляжа z_b.

В настоящей работе представлен краткий обзор исследований, касающихся причин развития ритмической прибрежной топографии. Главная цель заключается в том, чтобы охарактеризовать условия, при которых механизм самоорганизации может быть ответственен за формирование ритмических структур контура и профиля берега. Используются упрощенные модели, основанные на уравнениях (1) и (2), позволяющие представить искомые результаты в наглядной аналитической форме. В первой части работы рассматриваются ритмические формы контура берега, а во второй обсуждаются различные аспекты феномена подводных валов на береговом склоне.

РИТМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ КОНТУРА БЕРЕГА

В большинстве случаев волны распространяются к берегу под некоторым углом и создают вдольбереговой расход наносов Q_y. Его величина зависит, в частности, от угла подхода $\Theta_\infty + \delta$, где Θ_∞ – угол между направлением волн на глубокой воде и нормалью к берегу, а δ – угол отклонения береговой линии от генерального направления (рис. 1а). Максимум Q_y достигается при углах подхода около 45° [2, 31]. На рисунках 1б и в показаны изменения расхода наносов вдоль выступа береговой линии при малых (<45°) и больших (>45°) углах подхода. Очевидно, при малых углах увеличение $\Theta_\infty + \delta$ вниз по течению вызывает рост потока наносов ($\frac{\partial Q_y}{\partial y} > 0$) и размыв берега (рис. 1б). При больших углах (рис. 1в) увеличение $\Theta_\infty + \delta$ приводит к уменьшению потока наносов ($\frac{\partial Q_y}{\partial y} < 0$), аккумуляции и росту возмущения.

Прокомментируем этот результат, используя известную формулу расхода наносов CERC [26], которая может быть представлена в форме [9]:

$$Q_y = K_1 H_\infty^{12/5} T^{1/5} f_\infty,$$
$$f_\infty = \cos(\Theta_\infty + \delta)^{6/5} \sin(\Theta_\infty + \delta), \qquad (3)$$

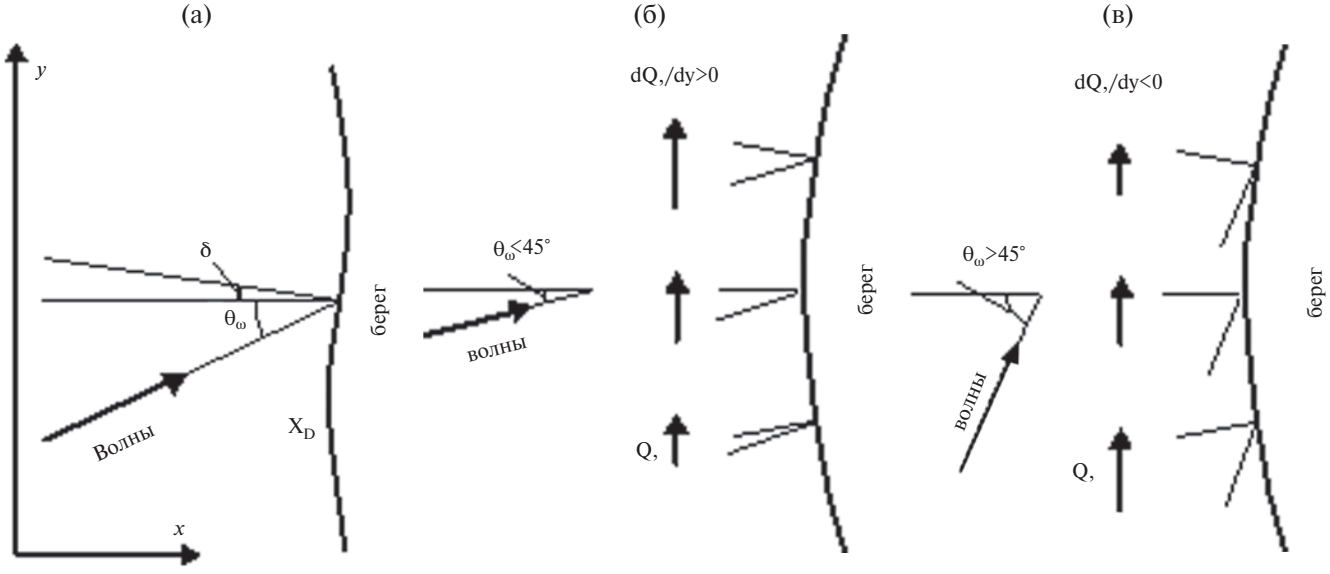

Рис. 1. Система координат (а) и изменения потока наносов вдоль волнообразного возмущения береговой линии при малых (б) и больших (в) углах подхода волн.

где K_1 – эмпирический коэффициент порядка 10^{-1} м$^{3/5}$с$^{-6/5}$, H_∞ – высота волн на глубокой воде, T – период волн. Допуская в первом приближении $f_\infty \approx \cos(\Theta_\infty + \delta)\sin(\Theta_\infty + \delta)$ и полагая угол δ достаточно малым ($\delta = \mathrm{arctg}\dfrac{\partial x_0}{\partial y} \approx \dfrac{\partial x_0}{\partial y}$), имеем

$$f_\infty = \cos\Theta_\infty \sin\Theta_\infty + \left(\cos^2\Theta_\infty - \sin^2\Theta_\infty\right)\frac{\partial x_0}{\partial y}.$$

Выделим два случая, когда угол подхода волн очень мал ($\Theta_\infty \to 0$, $f_\infty \to \dfrac{\partial x_0}{\partial y}$) и очень велик ($\Theta_\infty \to \dfrac{\pi}{2}$, $f_\infty \to -\dfrac{\partial x_0}{\partial y}$). Подставим величину $\overline{Q_y}$ в уравнение контура берега (2), полагая вклад $\overline{q_x}$ незначительным, и в итоге придем к уравнению диффузии:

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = \pm\nu_D \frac{\partial^2 x_0}{\partial y^2},\ \nu_D = \frac{K_2 H_\infty^{12/5} T^{1/5}}{h_* + z_b}, \qquad (4)$$

где ν_D – коэффициент диффузии, а знаки "+" и "±" относятся к случаям малых и больших углов подхода волн соответственно.

Пусть на первоначально прямой береговой линии появилось волнообразное возмущение $x_0 = a\sin ky$ с малой амплитудой a и длиной λ ($k = 2\pi/\lambda$). Подстановка x_0 в (4) приводит к уравнению $\dfrac{\partial a}{\partial t} = \mp\nu_D k^2 a$, из которого следует $a = a^{(0)} e^{\mp\nu_D k^2 t}$, где $a^{(0)}$ – начальная амплитуда в момент $t=0$. Теперь знак "∓" относится к малым Θ_∞, а знак "+" – к большим Θ_∞. Очевидно, при малых углах подхода возмущение контура берега затухает, а при больших углах – наоборот, растет со временем. Таким образом, во втором случае возникает положительная обратная связь между гидродинамикой и рельефом, запускающая механизм самоорганизации рельефа.

В реальных условиях "волнения больших углов" (high-angle waves) чередуются с "волнениями малых углов" и подходят к берегу с разных сторон относительно нормали. Эштон и Мюррей [9, 10] разработали модель эволюции контура берега**,** основанную на уравнениях (2) и (3), где тип волнового климата характеризуется двумя параметрами – U и A. Величина U отражает долю "волнений больших углов" (больше 45°), изменяется от 0 до 1 и определяет неустойчивость контура условием $U > 0.5$. Асимметрия волнового климата A характеризуется долей волн, приходящих к берегу с той или другой сторон от нормали (при $A = 0.5$ климат симметричен). В проведенных расчетах продолжительность отдельных волнений соответствовала 1 суткам, после чего направление и сила волнения случайным образом менялись. Каждый численный эксперимент охватывал период нескольких десятков лет. График на рис. 2а определяет условия развития тех или иных типов ритмических форм в координатах (A, U).

Из полученных результатов, представленных на рис. 2, следует, что ***вдольбереговые песчаные волны*** (рис. 2б) развиваются уже при небольшом доминировании "волнений больших углов" и мигрируют вдоль берега при достаточно заметной асимметрии волнового климата ($A \geq 0.65$). ***Мегафестоны*** (рисунки 2в, г) возникают в условиях, когда $U \geq 0.6$ и асимметрия волнового климата отсутствует или мала. ***Песчаные косы*** (рис. 2д) вырастают из вершин выпуклостей при сравнительно высоких значениях U и A, а при несколько меньших U и A формируются так называемые ***reconnecting spits*** (рис. 2е) – косы, головная часть которых под действием волн противоположного направления стремится соединиться с берегом.

Очевидно, модель "волнений больших углов" [9, 10] удовлетворительно воспроизводит наблюдаемые свойства ритмических форм контура берега. Их длина λ, согласно расчетам, растет со временем приблизительно как $\sqrt{t}$. В модельных экспериментах ритмические структуры, формировавшиеся в течение небольшого по геологическим меркам периода времени (первые десятки лет) достигали длины около 10 км.

Шаг ритмических форм, развивавшихся при более или менее постоянных условиях на протяжении всего позднего голоцена (5 тыс. лет), по расчетам, может достигать десятков км. Структуры такого масштаба действительно встречаются в природе, о чем свидетельствуют данные наблюдений, приведенные на рис. 3.

Рассмотренная модель "волнений больших углов" предполагает, что "волнения малых углов" не участвуют в формировании ритмических форм. Это однако является значительным упрощением реальной ситуации. Как показано ниже, при нормальном к берегу волнении также возникают условия для самоорганизации рельефа [7].

Допустим, что волны распространяются перпендикулярно или под малым углом к берегу, контур которого в начальный момент прямолинеен (рис. 4). В ходе обрушения волн средний уровень воды в прибойной зоне повышается и достигает значения ζ_0 на береговой линии.

Если на береговом контуре появляется возмущение $x_0 = -a\sin ky$ с малой амплитудой a и волновым числом k то возникающие градиенты уровня $\partial\zeta_0/\partial y$ порождают вдольбереговые

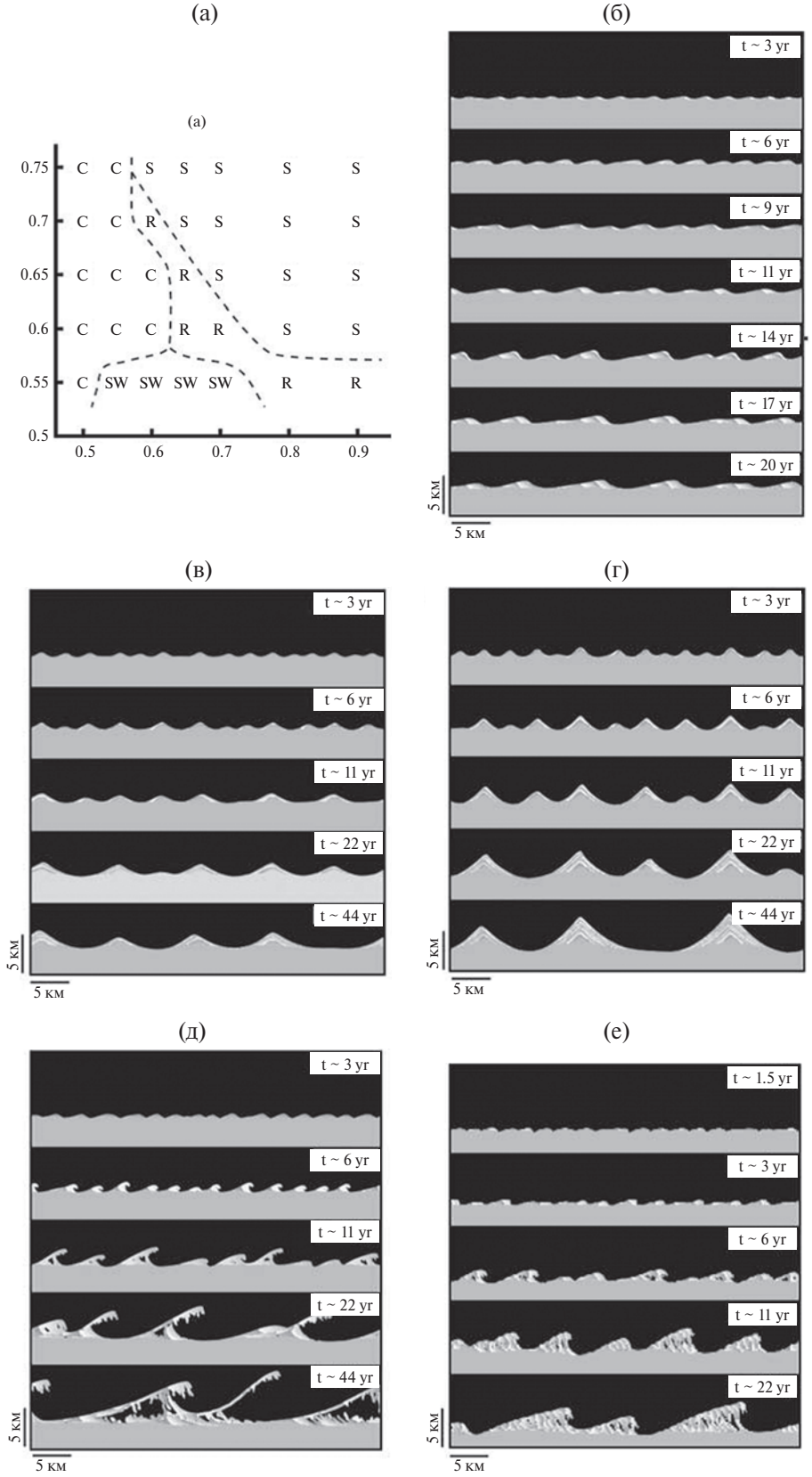

Рис. 2. (а) Типы ритмических структур контура берега, формирующиеся при различных сочетаниях параметров U и A: C – мега-фестоны, SW – вдольбереговые песчаные волны, S – песчаные косы, R – reconnecting spits; (б) вдольбереговые песчаные волны ($A=0.65$, $U=0.55$); (в) слабо выраженные мегафестоны ($A=0.5$, $U=0.6$); (г) рельефные мегафестоны ($A=0.5$, $U=0.7$); (д) песчаные косы ($A=0.7$, $U=0.65$); (е) reconnecting spits ($A=0.7$, $U=0.6$) (по [9, 10]).

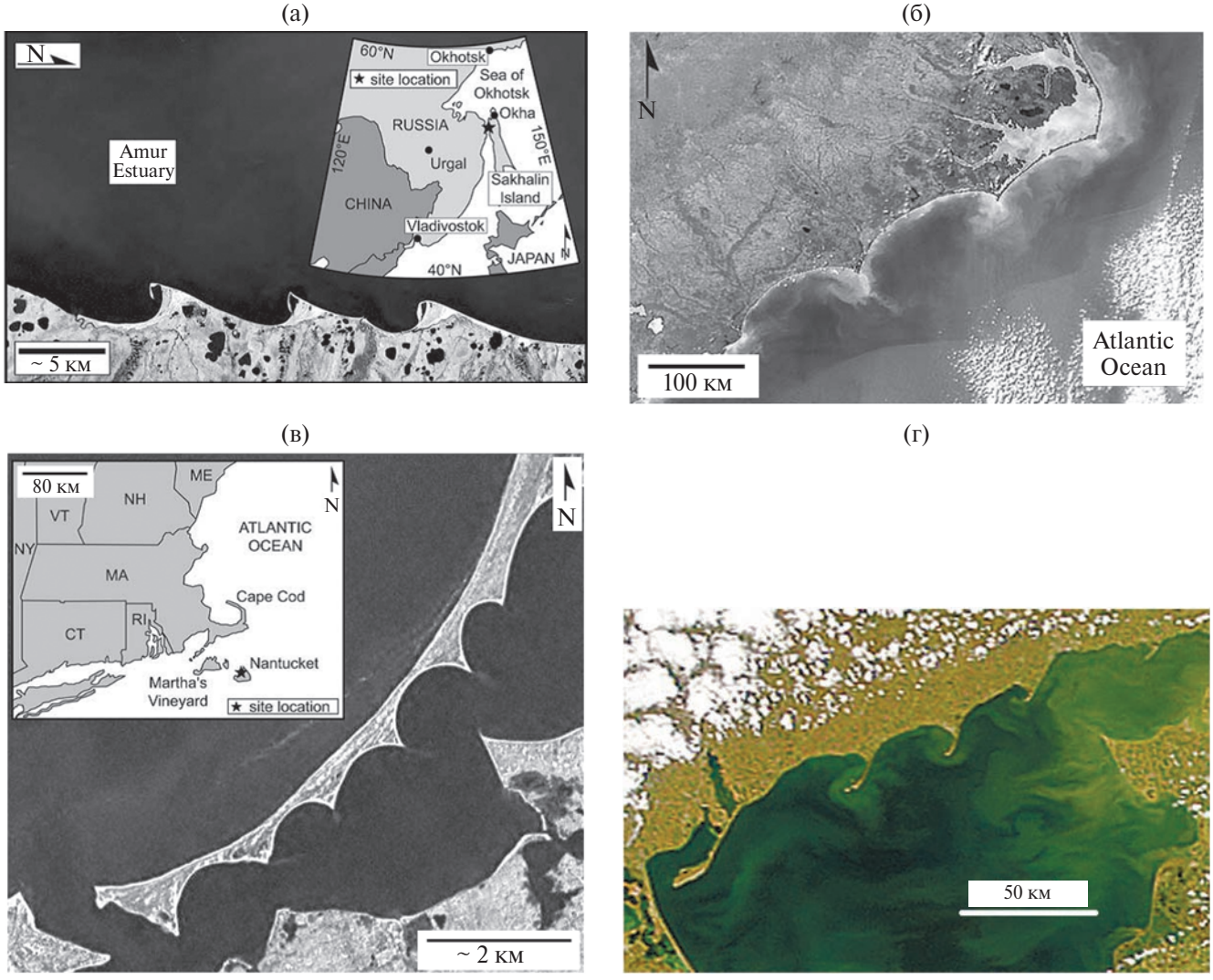

Рис. 3. Примеры ритмического рисунка береговой линии: (а) – эстуарий р. Амур, (б) – побережье Северной Каролины, (в) – береговой барьер о-ва Нантакет, (г) – северный берег Азовского моря (по [9, 10, 11]).

течения от мысов к бухтам (рис. 4). Здесь развиваются стоковые течения от берега (прообраз разрывных течений), а в районе мысов массы воды движутся к берегу, в результате чего формируются циркуляционные ячейки. Усредненные по ширине прибойной зоны поперечные U и продольные V скорости течений изменяются вдоль берега в соответствии с величинами $-kx_0$ и $\partial x_0/\partial y$,

$$U = -\widehat{U}kx_0,\ V = \widehat{V}\left(\partial x_0/\partial y\right), \qquad (5)$$

где $\widehat{U}$ и $\widehat{V}$ – амплитудные значения скоростей.

Чтобы выяснить, при каких условиях возмущение контура берега может расти со временем, воспользуемся уравнением эволюции береговой линии (2). Допуская, что транспорт наносов и изменения рельефа дна ограничиваются в основном пределами прибойной зоны, примем в качестве глубины замыкания h_* глубину обрушения волн h_B. Полагая транспортировку наносов преимущественно во взвеси (со средней концентрацией $\overline{c}$), и приняв среднюю глубину как $\frac{1}{2}\left(h_B + z_b\right)$, получим

$$\overline{q_x} = \frac{1}{2}\overline{c}\left(h_B + z_b\right)U,\ Q_y = \frac{1}{2}\overline{c}\left(h_B + z_b\right)l_B V, \qquad (6)$$

где l_B – ширина прибойной зоны. Приняв во внимание (5), подставим (6) в (2) и придем к уравнению диффузии:

$$\frac{\partial x_0}{\partial t} = \nu_D\left(\frac{\partial^2 x_0}{\partial y^2} + \frac{\widehat{U}}{\widehat{V}}\frac{kx_0}{l_B}\right),\ \nu_D = \frac{1}{2}\overline{c}l_B\widehat{V}, \qquad (7)$$

где ν_D – коэффициент диффузии. После подстановки величины $x_0 = -a\sin ky$ в (7) получим уравнение относительно амплитуды возмущения, $\frac{\partial a}{\partial t} = \left(\frac{\widehat{U}}{\widehat{V}}\frac{1}{kl_B} - 1\right)\nu_D k^2 a$, из которого следует

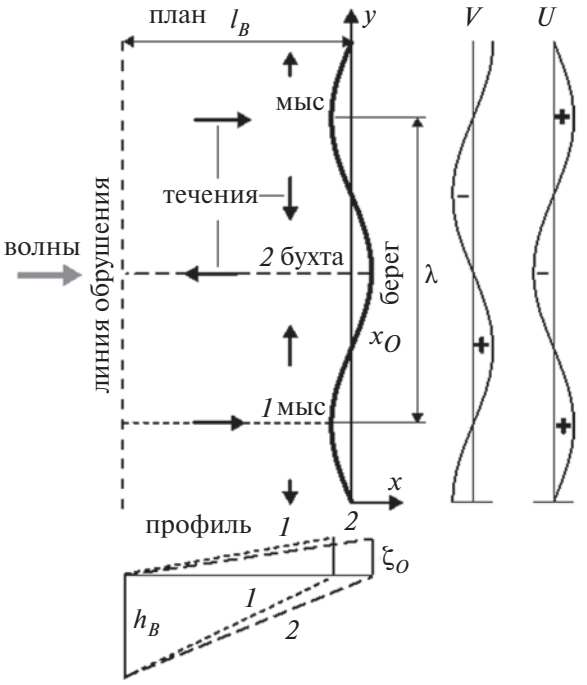

Рис. 4. Схема течений и потоков взвешенных наносов при нормальном подходе волн к берегу с волнообразным контуром.

$a = a^{(0)}\exp\left[\left(\frac{\widehat{U}}{\widehat{V}}\frac{1}{kl_B} - 1\right)\nu_D k^2 t\right]$, где $a^{(0)}$ – значение a в начальный момент $t=0$. Очевидно, при выполнении неравенства

$$\frac{\widehat{U}}{\widehat{V}}\frac{1}{kl_B} - 1 > 0 \text{ или } \frac{\lambda}{l_B} > 2\pi\frac{\widehat{V}}{\widehat{U}} \qquad (8)$$

возмущение растет со временем, т. е. возникает положительная обратная связь между гидродинамикой и рельефом. Следовательно, береговые фестоны могут формироваться в результате самоорганизации и без участия “волнений больших углов”.

Условие (8) определяет минимальную длину возмущения λ в зависимости от ширины прибойной зоны и скоростей течений в циркуляционной ячейке. Если поперечные и продольные скорости близки друг к другу ($\widehat{V}/\widehat{U} \approx 1$), то длина λ, согласно (8), должна быть больше $6l_B$. Однако скорости оттока воды, как правило, превышают скорости питающих вдольбереговых течений. Так, измерения [13] на побережье Австралии в условиях квазиравновесной циркуляционной ячейки при устойчивом умеренном волнении показали среднюю скорость разрывного течения 0.4–0.6 м/с и скорости питающих вдольбереговых течений 0.2–0.4 м/с. Соответствующие максимальные величины колебались в пределах 1.6–2.1 м/с и 1.0–1.3 м/с. Следовательно, типичное отношение $\widehat{V}/\widehat{U}$ можно оценить как 0.6. Тогда, согласно (8), оптимальный шаг системы береговых фестонов близок к четырехкратной ширине прибойной зоны:

$$\lambda \approx 4l_B. \qquad (9)$$

Структуры с меньшим шагом не имеют шансов для роста, так как для этого потребовалось бы слишком большое превышение поперечных скоростей течений над продольными. А при слишком большом шаге ассоциированные течения оказались бы слишком слабыми, чтобы поддержать рост возмущений. Заметим, что результат (9) совпадает с оценкой [23] в отношении оптимального размера прибрежных циркуляционных ячеек.

На рис. 5 показан фрагмент системы мегафестонов на побережье о. Сахалин (залив Терпения) с шагом от 0.5 до 1 км, сохраняющей свои черты на протяжении нескольких десятилетий [6]. Наиболее значимые волнения в заливе направлены вдоль нормали к берегу. Согласно (9), при среднем значении $\lambda \approx 800$ м система отвечает условиям волнения с шириной прибойной зоны около 200 м. При характерном уклоне дна 0.015 глубина обрушения h_B должна быть близка к 3 м, а значительная высота обрушающихся волн – к 1.5 м. Таким образом, данная система мегафестонов может поддерживаться умеренными волнениями, которые характеризуются достаточно большой суммарной продолжительностью в течение года.

На рис. 6 приведен пример пляжевых фестонов с шагом порядка первых десятков метров, созданных сравнительно слабым волнением. Прослеживаются серии подобных структур, построенных при разных положениях уровня прилива. При усилении волнения протяженность прибойной зоны возрастает, и шаг фестонов становится слишком малым, чтобы удовлетворить требованию (9). Поэтому существующая система размывается и формируются более крупные структуры. Необходимого для этого времени может не хватить из-за ограниченной продолжительности шторма, и при последующих слабых волнениях прежняя система фестонов может возродиться.

В процессе развития пляжевых фестонов взвешенные наносы, выносимые разрывными течениями, осаждаются в районах их головных частей, где скорость резко падает. Далее материал разносится в обе стороны вдоль берега и, попадая в область течения к берегу, перемещается в сторону мысов. В результате формируется аккумулятивное тело в виде выпуклого в сторону моря

Рис. 5. Система мегафестонов в заливе Терпения на о. Сахалин (по [6]).

Рис. 6. Пляжевые фестоны на побережье Португалии (г. Назаре, фото автора).

Рис. 7. Серповидный вал – светлая волнистая полоса, колеблющаяся в противофазе с линией контура берега (по [17]).

серповидного вала (crescentic bar), который представляет как бы зеркальное отражение пляжевого фестона (рис. 7). Рефракция волн над валом приводит к уменьшению высоты волн у мысов и увеличению ее в бухтах. В результате продольные градиенты среднего уровня, движущие циркуляцию, становятся менее контрастными. В итоге система может прийти к равновесию и оставаться стабильной, пока волновые условия не изменятся. Связь серповидного вала с мегафестонами подтверждается наблюдениями [17].

Мысы береговых фестонов иногда сильно вытягиваются в сторону моря, образуя так называемые поперечные валы (transverse bars), которые под влиянием вдольбереговых течений могут трансформироваться в косые валы (oblique bars). Такие формы наблюдаются на берегах с низкой энергетикой [36] (например, в Калининградском и Куршском заливах Балтики [1], в дельте р. Эбро на Средиземном море [20]). Они описываются довольно сложными 2DH моделями, использующими уравнения гидродинамики [20, 21].

РИТМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ПРОФИЛЯ БЕРЕГА

Речь в данном случае идет о системах параллельных берегу подводных валов. Их свойства и поведение до сих пор не получили исчерпывающего объяснения, но, по-видимому, контролируются механизмом самоорганизации рельефа [35]. Условия, при которых данный механизм может способствовать формированию вала, пока не достаточно ясны [32]. Для определения этих условий автором рассмотрена упрощенная модель динамики профиля берега [6], охарактеризованная ниже.

При распространении волн по нормали к берегу и отсутствии вдольберегового переноса уравнение сохранения массы (1) принимает вид

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x}. \qquad (10)$$

Для определения расхода наносов можно воспользоваться формулой [27], согласно которой q_x пропорционален разности локальной скорости диссипации энергии на единицу объема D и постоянной величины D_*, отвечающей равновесию профиля:

$$q_x = K\Phi_d \left| D - D_* \right| + \varepsilon \frac{\partial h}{\partial x}. \qquad (11)$$

Здесь K и ε – коэффициенты пропорциональности (1.1×10^{-6} м^{4}н$^{-1}$ и 0.6×10^{-3} м^{3}м$^{-1}$с$^{-1}$ соответственно), Φ_d – функция направления, принимающая значения 1 (перенос к берегу) или -1 (перенос от берега). Второе слагаемое в правой части представляет вклад силы тяжести ($\frac{\partial h}{\partial x} < 0$, если дно повышается к берегу).

Диссипация энергии D, обусловленная обрушением волн, при определенных условиях оказывается прямо пропорциональной уклону дна $\beta = -\frac{\partial h}{\partial x}$ [6]:

$$D = \frac{1}{4}\rho g \gamma^2 \sqrt{g h_B}\left(-\frac{\partial h}{\partial x}\right), \qquad (12)$$

где ρ – плотность воды, g – ускорение силы тяжести, h_B – глубина обрушения, $\gamma = 0.37$ [28]. А значит, и расход наносов q_x в (11) пропорционален β. Подстановка величины $\partial q_x / \partial x$ в (10) приводит к уравнению диффузии:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nu_D \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}, \; \nu_D = -\left(\frac{1}{4} K \Phi_d \rho g \gamma^2 \sqrt{g h_B} - \varepsilon\right). \qquad (13)$$

Допустим, что на плоском наклонном дне возникает возмущение с малой амплитудой a и волновым числом k. Тогда профиль глубин можно представить как $h = \bar{\beta}(l_B - x) - a\sin kx$, где $\bar{\beta} = h_B / l_B$ – средний уклон дна, l_B – длина области диссипации энергии (ширина прибойной зоны). Подставив h в (13) получим уравнение для амплитуды возмущения, $\frac{da}{dt} = -\nu_D k^2 a$, откуда следует

$$a = a^{(0)} e^{-\nu_D k^2 t}, \qquad (14)$$

где $a^{(0)}$ – начальное значение a. Если коэффициент диффузии $\nu_D>0$, то возмущение затухает, а при $\nu_D<0$ его амплитуда растет со временем. Принимая во внимание величину ν_D в (13), можно констатировать, что при перемещении наносов от берега в море ($\Phi_d=-1$) рельеф сглаживается, а при транспортировке материала в сторону берега ($\Phi_d=1$) возникшее возмущение растет со временем.

Положительная обратная связь между транспортом наносов к берегу и ростом подводного вала иллюстрируется результатами измерений [14] на голландском побережье Северного моря (рис. 8). Так как расход наносов q_x пропорционален уклону дна β, то над выпуклым участком дна (валом) он уменьшается, следуя уменьшению β, что, в свою очередь, вызывает аккумуляцию материала и рост вала. Именно этот тренд зафиксирован на рис. 8.

Принципиальным условием для роста возмущения является перенос к берегу над его внешним склоном. При штормовом волнении материал, смытый с пляжа, транспортируется противотечением в обратном направлении [4, 5]. Сам по себе поток вниз по склону сглаживает рельеф, но его столкновение с встречным потоком приводит к аккумуляции песка и росту вала. Таким образом, вал в зоне обрушения штормовых волн может трактоваться как форма, созданная двумя механизмами – самоорганизации и конвергенции. Согласно наблюдениям, донные наносы на внешнем склоне вала продолжают перемещаться в сторону берега даже при перемещении самого вала в сторону моря в ходе шторма [22].

Полученные результаты помогают интерпретировать некоторые известные свойства мульти-валовых систем, которые испытывают циклические изменения с периодом порядка 10 лет (рис. 9). На побережье Голландии (район Эгмонд, рис. 9а) вал зарождается вблизи берега (на глубинах 1–2 м), затем смещается в сторону моря, увеличиваясь в размерах, после чего деградирует и на глубинах более 7 м исчезает [33, 34]. На западном побережье Дании (район Скаллинген, рис. 9б) наблюдается противоположный тип эволюции [8]. Вал возникает вдали от берега (на глубинах около 4 м), затем мигрирует в сторону берега и, в конце концов, примыкает к пляжу, что открывает новый цикл.

Различия в направлении перемещения валов, возможно, связаны с различным влиянием силы тяжести, поскольку береговой склон в Голландии примерно вдвое круче, чем в Дании. Что касается общих черт, то в обеих системах первичные валы генерируются за пределами зоны обрушения штормовых волн, где действуют либо слабые волнения, либо сравнительно крупные волны, еще не начавшие обрушаться. В обоих случаях наиболее вероятен транспорт наносов в сторону берега, так как доминирующим фактором переноса слу-

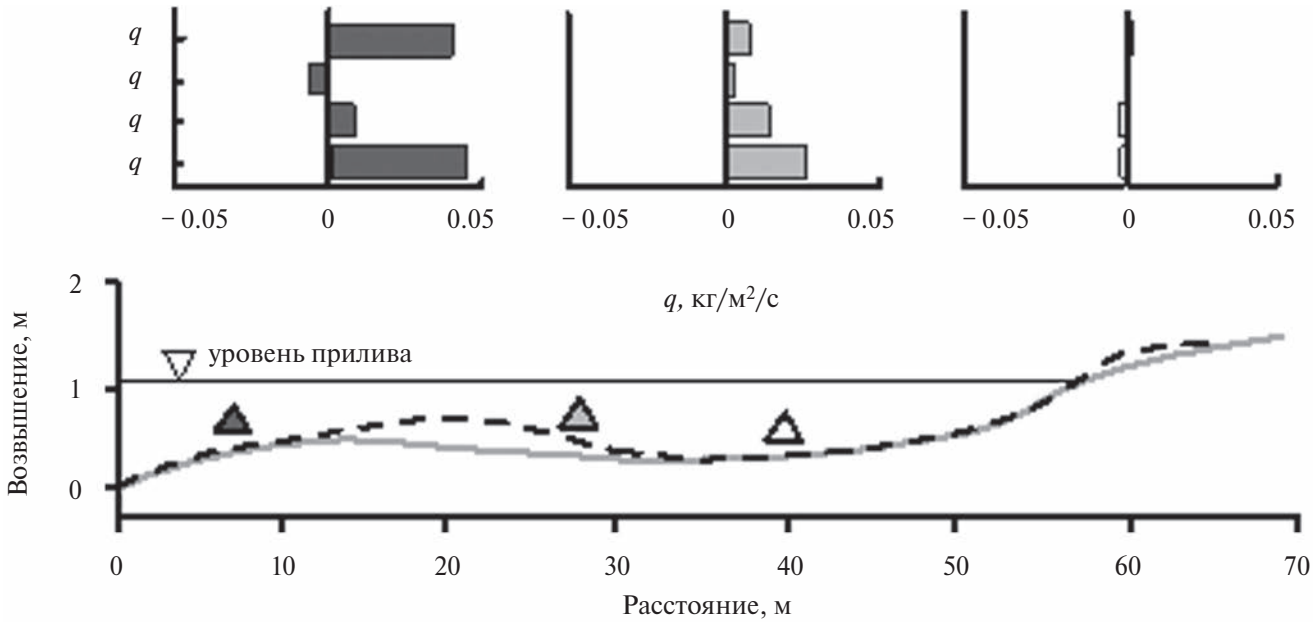

Рис. 8. Расходы песка, измеренные в трех точках профиля подводного вала (треугольники): q_h – вклад волновых движений, q_l – вклад инфрагравитационных колебаний, q_m – вклад среднего течения, q_T – полный расход. Песок на дне среднезернистый (0.35 мм) Показаны начальный профиль дна (сплошная линия) и конечный профиль (прерывистая линия), зафиксированный после двух приливных циклов (длительностью по 6 ч каждый) при действии волн зыби с высотой 0.35 м и периодом 9 с. Высота прилива около 0.5 м (по [14]).

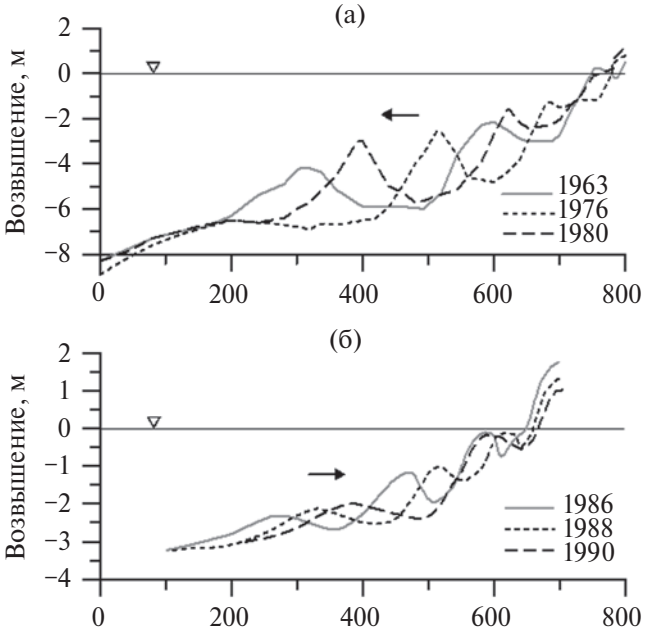

Рис. 9. Эволюция мульти-валовых систем: (а) – на побережье Голландии (Эгмонд) в период 1968–1980 гг. по данным [33, 34], (б) – на западном побережье Дании (Скаллинген) в период 1986–1990 гг. по данным [8]. Направление перемещения валов показано стрелками.

жит асимметрия волновых скоростей. А значит, создаются благоприятные условия для самоорганизации рельефа.

Дальнейший рост вала по мере его смещения и приближения к зоне обрушения штормовых волн, по-видимому, обусловлен как увеличением объемов перемещающихся наносов, так и подключением дополнительного механизма аккумуляции, связанного с конвергенцией потоков. При выходе вала за пределы района обрушения данный механизм перестает действовать, а потоки материала уменьшаются, что приводит к деградации вала.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суть механизма самоорганизации состоит в установлении положительной обратной связи между гидродинамикой и транспортом наносов с одной стороны и рельефом с другой. Это дает толчок к росту малого возмущения, которое в дальнейшем может трансформироваться в тот или иной тип ритмических структур контура и профиля песчаного берега. Результат зависит от исходных свойств морфологии и режима волнений.

Действие механизма самоорганизации может быть выявлено с помощью моделей морфодинамики, использующих принцип сохранения массы. При некоторых допущениях сохранение массы можно выразить в терминах уравнения диффузии. С его помощью удается определить условия, при которых возникшее возмущение будет либо затухать, либо расти со временем. Последнее означает развитие рельефа путем самоорганизации.

Данный подход позволяет объяснить, например, развитие ритмических форм под влиянием “волнений больших углов”, обусловливающих рост возмущений контура берега. Важную роль при этом играют параметры волнового климата, характеризующие вклад волн с углом подхода более 45° (U) и асимметрию распределения волн по направлениям относительно нормали (A). Так, формирование песчаных кос отвечает режимам с наиболее высокими значениями U и A, песчаные волны возникают при меньших U и A, а для мегафестонов благоприятным оказывается симметричный волновой климат [10]. Шаг подобных форм растет со временем приблизительно пропорционально $\sqrt{t}$ и может достигать десятков километров.

Применение того же подхода к ситуации нормального к берегу волнения приводит к выводу, что возмущения контура берега могут развиваться и без участия “волн больших углов”, а именно, благодаря горизонтальной циркуляции в прибойной зоне. При определенном соотношении продольных и поперечных скоростей течений в циркуляционных ячейках возможен рост возмущений рельефа, вызывающий формирование пляжевых фестонов и мегафестонов. Первые обусловливаются слабыми волнениями и исчезают при смене обстановки. Мегафестоны поддерживаются умеренными режимами и могут сохраняться на протяжении десятков лет. Шаг их периодичности соответствует примерно 4-х кратной ширине прибойной зоны и не обнаруживает тенденции к росту, как в случае “волн больших углов”.

Изменения профиля берега при определенных допущениях также можно описать в терминах уравнения диффузии. Эволюция волнообразного возмущения на дне оказывается зависящей от направления транспорта наносов над его внешним склоном (обращенным к морю). Поток материала в сторону моря сглаживает неоднородности дна, тогда как перенос осадков к берегу способствует росту возмущения и развитию подводного вала. Здесь прослеживается определенная аналогия с ситуацией “волн больших углов”, когда изменения потока наносов вдоль выступа берега приводят к его росту. В зоне обрушения волн к механизму самоорганизации подключается механизм

конвергенции, обусловленный поставкой материала противотечением.

Полученные результаты помогают связать наблюдаемое циклическое поведение подводных валов с самоорганизации рельефа. Тем не менее, эволюция мульти-валовых систем и составляющих их элементов все еще вызывает много вопросов. Не всегда понятно, почему ритмические формы развиваются на одних берегах, но не проявляются на других, характеризующихся схожими условиями природной среды. Остающиеся неопределенности должны служить стимулом для дальнейших исследований ритмической прибрежной топографии.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0018).

Конфликт интересов. Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бадюкова Е.Н., Жиндарев Л.А., Лукьянова С.А., Соловьева Г.Д.* Пляжевые фестоны на аккумулятивных берегах юго-восточной Балтики // Геоморфология. 2014. № 4. С. 31–39.
2. *Зенкович В.*П. Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
3. *Леонтьев И.О.* Профиль равновесия и система подводных береговых валов // Океанология. 2004. Т. 44. № 4. С. 625–631.
4. *Леонтьев И.О.* Динамика берегового профиля с подводными валами в масштабе штормового цикла // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 805–813.
5. *Леонтьев И.О.* Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 251 с.
6. *Леонтьев И.О.* О механизмах формирования подводных валов на песчаном береговом склоне // Океанология. 2023. Т. 63. № 3. С. 467–474.
7. *Леонтьев И.О., Афанасьев В.В., Уба А.В.* Ритмические структуры контура берега в заливе Терпения острова Сахалин // Океанология. 2019. Т. 59. № 3. С. 497–505.
8. *Aagaard T., Davidson-Arnott R., Greenwood B., Nielsen J.* Sediment supply from shoreface to dune: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution // Geomorphology. 2004. V. 60. P. 205–224.
9. *Ashton A.D., Murray A.*B. High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits and capes // J. of Geophys. Res. 2006. V. 111. F04012.
10. *Ashton A.D., Murray A.B.* High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 2. Wave climate analysis and comparisons to nature // J. of Geophys. Res. 2006. V. 111. F04012.
11. *Ashton A.D., Murray A.B., Arnault O.* Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high-angle waves // Nature. 2001. V. 414. P. 296–300.
12. *Bowen A.J., Huntley D.A.* Waves, long waves and nearshore topography // Marine Geol. 1984. V. 60. P. 1–13.
13. *Brander R.W.* Field observations on the morphodynamic evolution of a low-energy rip current system // Marine Geol. 1999. V. 157. P. 199–217.
14. *Brinkkemper J.A., Aagaard T., de Bakker A.T.M., Ruessink B.*G. Shortwave sand transport in the shallow surf zone // J. Geophys. Res. Earth Surface. 2018. 123. P. 1145–1159.
15. *Bruun P.* The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages // J. of Coastal Res. 1988. V. 4. № 4. P. 627–648.
16. *Cowell P.J., Thom B.G.* Morphodynamics of coastal evolution. // Coastal evolution: late quarternary shoreline morphodynamics / R.W.G. Carter, C.D. Woodroffe (Eds.). Cambridge Univ. Press, 1995. P. 33–86.
17. *De Swart R.L., Ribas F., Calvete D. et al.* Observations of megacusp dynamics and their coupling with crescentic bars at an open, fetch-limited beach // Earth Surface Processes and Landforms. 2022. V. 47. № 13. P. 3180–3198.
18. *Deigaard R., Drønen N., Fredsøe J. et al.* A morphological stability analysis for a long straight barred coast // Coastal Eng. 1999. V. 36. P. 171–195.
19. *Dronkers J.* Dynamics of coastal systems. World Scientific Publishing, 2005. V. 25. 519 p.
20. *Falqués A., Coco G., Huntley D.A.* A mechanism for the generation of wave-driven rhythmic patterns in the surf zone // J. of Geophys. Res. 2000. V. 105. № C10. P. 24071–24087.
21. *Falqués A., Dodd N., Garnier R. et al.* Rhythmic surf-zone bars and morphodynamic self-organization // Coastal Eng. 2008. V. 55. P. 622–641.
22. *Grossmann F., Hurther D., van der Zanden J. et al.* Near-bed sediment transport during offshore bar migration in large-scale experiments // J. of Geophys. Res. Oceans. 2021. V. 127. e2021JC017756.
23. *Hino M.* Theory on formation of rip current and cuspidal coast // 14th Int. Conf. Coast. Eng. ASCE. 1974. P. 901–919.
24. *Holman R.A., Bowen A.J.* Bars, bumps and holes: models for the generation of complex beach topography // J. of Geophys. Res. 1982. V. 87. № C1. P. 457–468.
25. *Kaergaard K., Fredsøe J.* Numerical modeling of shoreline undulations part 1: Constant wave climate // Coastal Eng. 2013. V. 75. P. 64–76.
26. *Komar P.D.* Beach Processes and Sedimentation. Prentice-Hall, 1998. 544 p.
27. *Larson M., Kraus N.C.* SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change. Tech. Rep. CERC-89–9. 1989. US Army Eng. Waterw. Exp. Station. Coastal Eng. Res. Center.

28. *Leont'yev I.O.* Randomly breaking waves and surf-zone dynamics // Coastal Eng. 1988. V. 12. P. 83–103.
29. *Miller C.D., Barcilon A.* Hydrodynamic instability in the surf zone as a mechanism for the formation of horizontal gyres // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. № C8. P. 4107–4116.
30. *Orzech M.D., Reniers A.J.H.M., Thornton E.B., MacMahan J.H.* Megacusps on rip channel bathymetry: Observations and modeling // Coastal Eng. 2011. V. 58. P. 890–907.
31. *Pelnard-Considére R.* Essai de theorie de l'evolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. Quatr. J. hydraulique. Paris, 1956. Question 3. Rapp. № 1.
32. *Ribas F., Falqués A., Plant N., Hulscher S.* Self-organization in surf zone morphodynamics: alongshore uniform instabilities // Proc. Int. Conf. "Coastal Dynamics'01". 2001. Sydney. P. 1068–1077.
33. *Ruessink B.G., Terwindt J.H.J.* The behavior of nearshore bars on the time scale of years: a conceptual model // Marine Geol. 2000. V. 163. P. 289–302.
34. *Van Rijn L.C., Ruessink B.G., Mulder J.P.M.* Summary of project results // Coast3D–Egmond. The behavior of a straight sandy coast on the time scale of storms and seasons. Amsterdam: Aqua Publ., 2002.
35. *Wijnberg K.M., Kroon A.* Barred beaches // Geomorphology. 2002. V. 48. P. 103–120.
36. *Wright L.D., Short A.D.* Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis // Marine Geol. 1984. V. 56. P. 93–118.

RHYTHMIC PATTERNS OF THE SANDY COAST AND SELF-ORGANIZATION OF THE RELIEF

I. O. Leont'yev*

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

** e-mail: igor.leontiev@gmail.com*

The phenomenon of rhythmic patterns of the coastal-zone morphology (beach cusps, alongshore sand waves, spits and nearshore bars) is considered as the result of self-organization of the relief when establishing a positive feedback between sediment transport and morphology. It is shown that the dynamics of the contour and profile of the coast can be described in terms of the diffusion equation, which allows for both attenuation and growth of relief disturbances. The conditions under which the self-organization mechanism is activated and the resulting disturbances grow over time are determined. Rhythmic structures of the coastal contour are traditionally associated with waves propagating at a large angle relative to the coastal normal. However, it has been shown that the self-organization of beach cusps and megacusps is also realized in normal shore waves due to the development of circulation cells in the surf zone. The conclusion is substantiated that the formation of nearshore bars under certain conditions is also determined by the self-organization mechanism. The results obtained help to interpret the available observational data regarding the evolution of multiple bar systems.

Keywords: sea coast, relief self-organization, rhythmic patterns of the shore contour and the bed profile, sediment transport

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 690–705

МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.242:552.3 (51)

ТЮШЕВСКИЙ МОРСКОЙ ПАЛЕОБАССЕЙН (ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА): ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЯ

© 2024 г. Н. В. Цуканов

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

e-mail: kambear2011@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.07.2023 г.
После доработки 05.09.2023 г.
Принята к печати 28.12.2023 г.

В работе рассмотрены особенности строения и состава толщ, слагающих Тюшевский прогиб Восточной Камчатки, который формировался на месте Ветловского бассейна окраинноморской природы. Время начала формирования этой структуры, вероятно, поздний эоцен–олигоцен. Предложена схема эволюции этого бассейна. В современной структуре отложения Тюшевского бассейна перекрывают вещественные комплексы и структуры различных террейнов и участвуют в аккреционной структуре региона. Осадочные образования представлены преимущественно фациально-изменчивыми грубыми прибрежно-морскими и/или дельтовыми отложениями, которые сменяются вверх по разрезу более глубоководными флишевыми образованиями. С этими комплексами связаны проявления нефтеносности.

Ключевые слова: северо-запад Тихого океана, Восточно-Камчатская аккреционная область, окраинноморские бассейны, вещественные комплексы, терригенные породы, осадконакопление, геодинамика.

DOI: 10.31857/S0030157424040124, **EDN:** PQYTYH

ВВЕДЕНИЕ

Восточная Камчатка (рис. 1) является типичной молодой активной континентальной окраиной, сформированной в кайнозойское время, в процессе аккреции и коллизии тектоно-стратиграфических террейнов [1, 20, 27, 33, 34, 37, 52 и др.]. В структуре района выделяются несколько террейнов островодужной и окраинноморской природы: Озерновско-Валагинский (K_2–P_1), Кроноцкий (K_2–P_2) Ветловский (K_2–P_2), а также наложенные или унаследованные прогибы и депрессии. Основными структурами являются Западно-Камчатский прогиб, Центрально-Камчатская депрессия, Тюшевский (Восточно-Камчатский) прогиб. Вещественные комплексы Тюшевского прогиба участвуют в аккреционной структуре Восточной Камчатки. Верхнемиоцен-плиоцен-четвертичные терригенные и плиоцен-четвертичные вулканогенные образования Восточно-Камчатского вулканического пояса (ВКВП) перекрывают аккреционные структуры Восточной Камчатки и являются неоавтохтонным чехлом. К вещественным комплексам унаследованных бассейнов можно отнести верхнеэоцен-олигоцен-миоценовые отложения, формировавшиеся в пределах Тюшевского прогиба. В современной структуре Восточной Камчатки они перекрывают вещественные комплексы и структуры тектоно-стратиграфических террейнов различной природы.

Тюшевский прогиб Восточной Камчатки также интересен как структура, выполненная мощными терригенными кайнозойскими отложениями с признаками нефтеносности [6, 8, 17, 28, 29].

Следует отметить, что единой точки зрения на стратиграфическое расчленение толщ, слагающих Тюшевский прогиб, до настоящего времени нет. В различных районах они часто выделяются в самостоятельные подразделения с местными названиями [3, 6, 10–14, 16, 17, 24, 28, 31]. Это обусловлено разрозненностью обнажений, отсутствием хороших возрастных датировок, монотонностью состава, плохой обнаженностью. В целом возрастной интервал для отложений Тюшевского прогиба оценивается с раннего олигоцена по миоцен.

В настоящее время процессы коллизии и аккреции продолжаются и контролируются взаимодействием Командорского блока Алеутской дуги

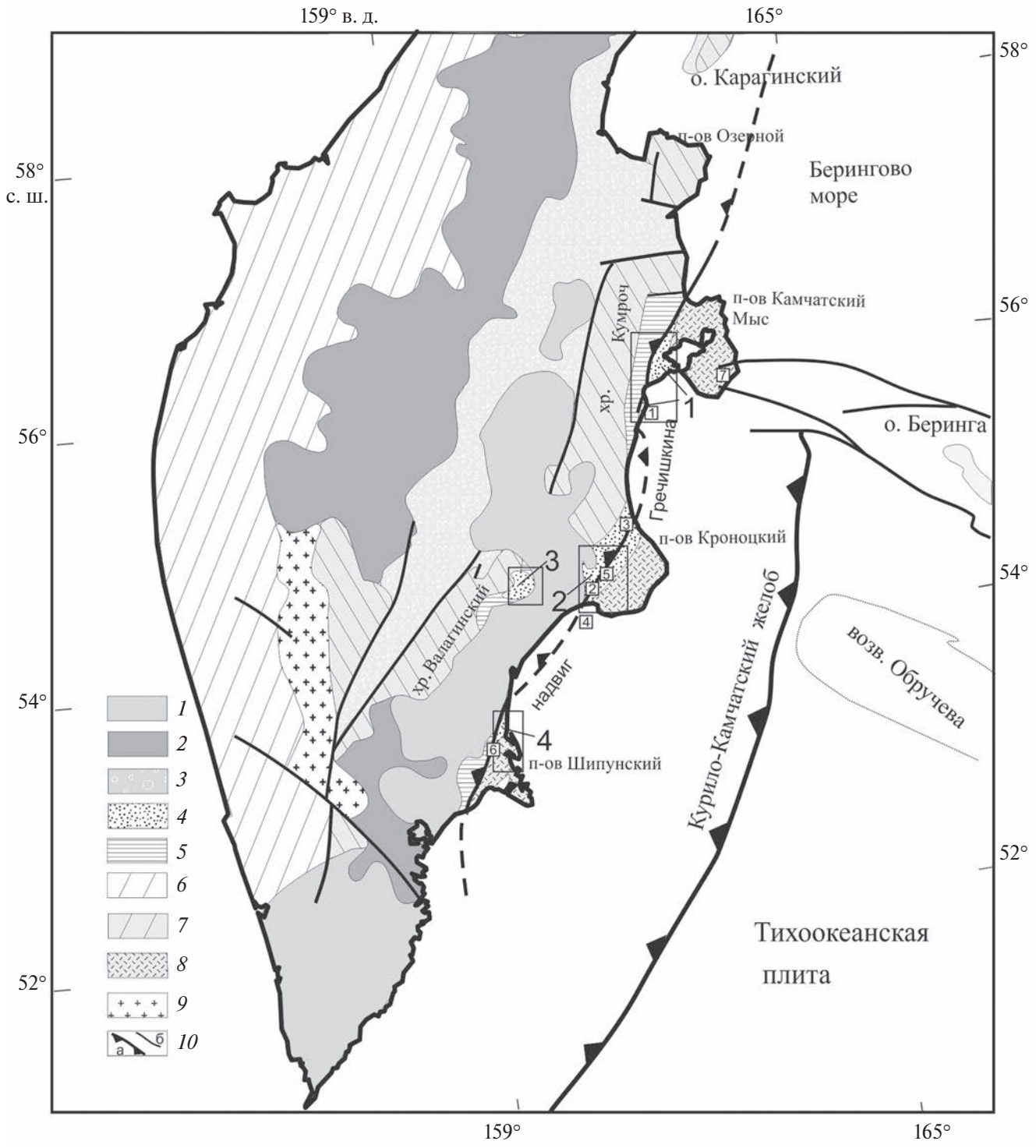

Рис. 1. Структурная схема Камчатки с районами выходов вещественных комплексов Тюшевского прогиба (составлена с использованием [9, 12, 15]): *1* – Восточно-Камчатский вулканический пояс (N_2–Q); *2* – Срединно-Камчатский вулканический пояс (P_3–Q); *3* – Центрально-Камчатская депрессия (P_3–Q); *4* – Тюшевский (Восточно-Камчатский) прогиб (P_2–N_1); *5* – Ветловский террейн (K_2–P_2); *6* – Западно-Камчатский террейн (K_1–P_2); *7* – Озерновско-Валагинский террейн; *8* – Кроноцкий террейн; *9* – метаморфические комплексы; *10* – разломы: *а* – надвиги, *б* – недифференцированные. Цифрами на рис. обозначены районы выходов вещественных комплексов Тюшевского бассейна: 1 – северный (хр. Кумроч), 2 – центральный (Кроноцкий п-ов), 3 – западный (Валагинский хр.), 4 – южный (Шипунский п-ов); цифрами в квадратах – основные географические названия, употребляемые в тексте: 1 – р. Горбуша, 2 – р. Тюшевка и р. Ольга, 3 – р. Мал. Чажма, 4 – бухта Ольга, 5 – р. Ракитинская и руч. Игорева, 6 – р. Вахиль, 7 – р. Пикеж.

с Камчатской окраиной и субдукцией Тихоокеанской плиты под Восточную Камчатку [32, 39, 48]. До настоящего времени остается дискуссионным вопрос о времени начала аккреции Кроноцкого террейна островодужной природы к Камчатской окраине и времени его амальгамации в структуре [1, 20, 21, 23, 34, 43, 45, 47]. В связи с этим для понимания кайнозойской эволюции Восточной Камчатки является важным анализ строения и состава вещественных комплексов Тюшевского прогиба, а также его история развития.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Тюшевский прогиб протягивается более чем на 350 км в северо-восточном направлении по восточному побережью Камчатки. Отложения, слагающие его, в современной структуре обнажаются фрагментарно, ширина выходов составляет около 15 км в северном сегменте в хр. Кумроч, 5–7 км в южном сегменте в бассейне р. Вахиль и 35–40 км на перешейке Кроноцкого п-ова в центральном сегменте. Они перекрыты вулканогенными образованиями ВКВП и терригенными верхнемиоцен–четвертичными отложениями. Выходы вещественных комплексов Тюшевского прогиба картируются в четырех сегментах Восточной Камчатки (рис. 1, 2): северный сегмент – Восточный склон хребта Кумроч; центральный сегмент – западная и южная части Кроноцкого п-ова (бассейны рек Тюшевка и Мал. Чажма); западный сегмент – хребет Валагинский; южный сегмент – Шипунский п-ов (бассейн р. Вахиль). Мощность слагающих его отложений максимальна в центральных частях и уменьшается в восточном, юго-восточном и в западном направлениях, в сторону восточных полуостровов и восточных хребтов Камчатки [14, 31, 44, 45]. Внутренняя структура Тюшевского прогиба осложнена крупным региональным надвигом (надвиг Гречишкина) [16, 46]. В южной части хребта Кумроч по нему на отложения Тюшеского прогиба надвинуты образования Ветловского террейна [4, 9, 11, 35]. В районе Кроноцкого перешейка по надвигу Гречишкина совмещены отложения западного и восточного бортов прогиба [5, 10, 42, 47]. В пределах Кроноцкого п-ова, в северной части Валагинского хребта и по левому берегу р. Вахиль (Шипунский п-ов) наблюдается несогласное, с размывом, залегание разновозрастных отложений Тюшевского прогиба на различных вулканогенно-туфогенных толщах Кроноцкого террейна (кроноцкая серия) и на терригенных, вулканогенных и кремнисто-терригенных породах Ачайваям-Валагинского и Ветловского террейнов [4, 10, 19, 31, 36, 41]. В пределах Тюшевского прогиба выделяется несколько разновозрастных полифациальных комплексов (рис. 3), имеющих возрастной диапазон в пределах позднего эоцена–раннего олигоцена–миоцена [5, 7, 10–12, 38]. В различных местах прогиба возраст, мощность и состав толщ несколько различаются, но общий характер разреза и возрастной диапазон сохраняются. Наблюдаются фациальные переходы между одновозрастными отложениями [3, 14, 36]. Бояринова М.Е. [10] помещает в основание разреза тундровскую свиту, обнажающуюся в Кроноцком районе, для которой устанавливается позднеэоценовый возраст [11]. Отложения этой свиты обнажены в западной части прогиба.

В целом толщи залегают достаточно спокойно и во многих местах можно наблюдать послойные разрезы и только в районе надвига Гречишкина наблюдаются интенсивные складчатые дислокации и разрывные нарушения.

Строение и состав вещественных комплексов. *Северный сегмент* (Хребет Кумроч). В северной части хр. Кумроч (рис. 1–3) отложения Тюшевского прогиба обнажаются вдоль его восточных склонов. М.Е. Бояринова [11] объединяет эти комплексы в чажминскую свиту (олигоцен) и миоценовую горбушинскую толщу (тюшевская серия). Отложения чажминской свиты имеют локальное незначительное распространение и слагают тектонические блоки и пластины. Контакты между породами чажминской свиты и горбушинской толщей тектонические. Нижнего контакта отложений Тюшевского прогиба в данном районе не описано. К северу и востоку вся структура перекрыта верхнемиоцен-четвертичными рыхлыми отложениями или закрыта водами Камчатского залива. С запада и северо-запада на отложения прогиба надвинуты кремнисто-терригенные образования Ветловского террейна.

Чажминская свита сложена преимущественно туфопесчаниками, туфогравелитами, алевролитами, аргиллитами, туфодиатомитами, пелитоморфными и органогенными известняками, отмечаются прослои туфов основного-кислого состава. Мощность свиты не превышает 600 м. В обломочной части в туфопесчаниках и туфогравелитах, наряду с обломками кристаллокластики, широко представлены обломки пород как вулканических (базальты, андезибазальты, андезиты, дациты, вулканическое стекло), так и осадочных пород (кремни, аргиллиты, алевролиты, глинистые сланцы). В туфодиатомитах, наряду с диатомеями и спикулами губок, присутству-

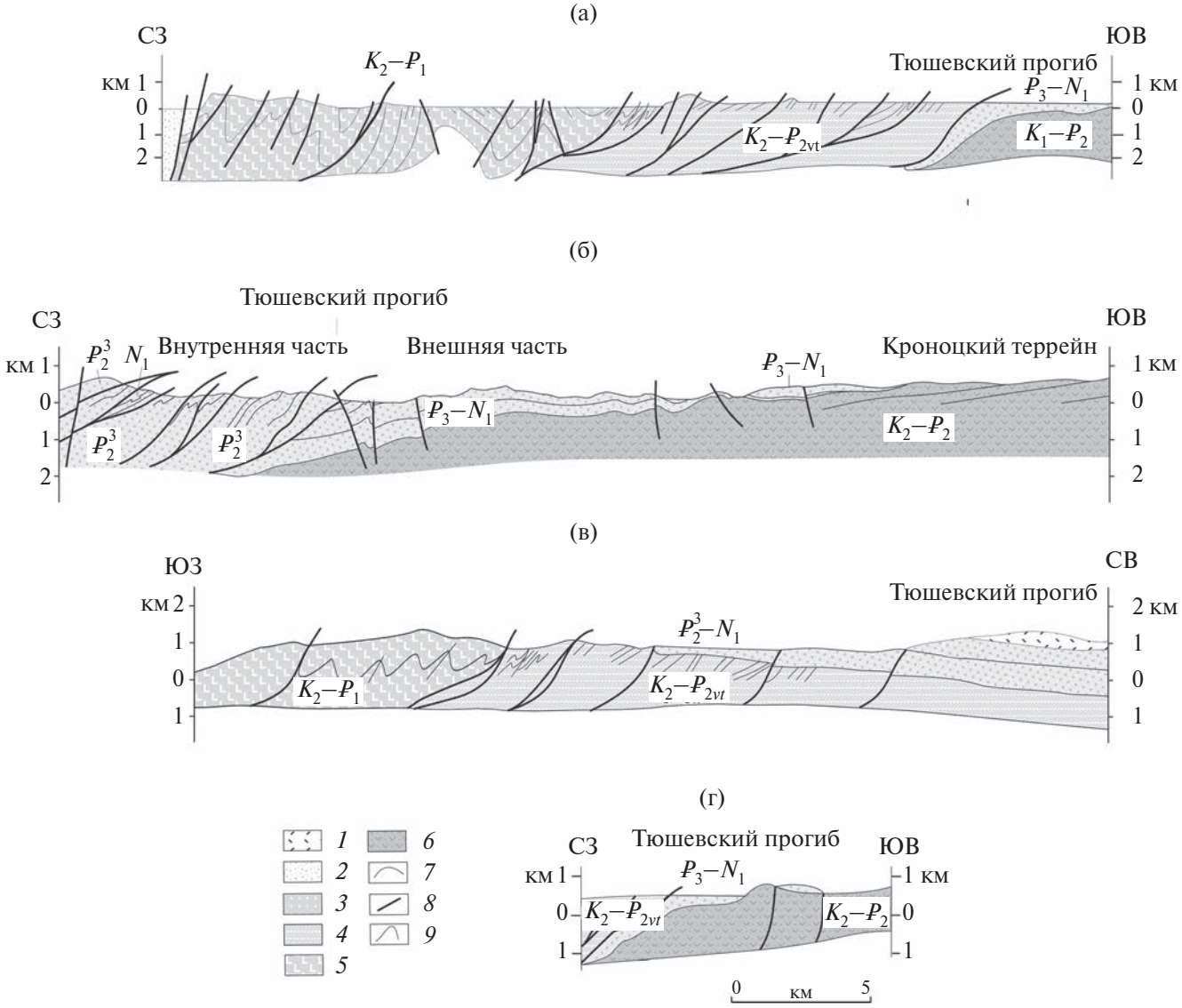

Рис. 2. Структурные профили через различные сегменты Тюшевского прогиба (составлены с использованием [9, 24, 49]): *1–6* – вещественные комплексы*: 1* – Восточно-Камчатского вулканического пояса (N_2–Q); *2* – Центрально-Камчатской депрессии (P_3–Q); *3* – Тюшевского прогиба (P_2–N_1); *4* – Ветловского террейна (K_2–P_2); *5* – Озерновско-Валагинского террейна (K_2–P_1); *6* – Кроноцкого террейна (K_1–P_2); *7* – геологические границы; *8* – разломы; *9* – элементы структуры. Цифры над профилями соответствуют районам, выделенным на рис. 1.

ет в небольшом количестве пирокластический и осадочный материал, по составу аналогичный обломкам туфопесчаников. Возраст свиты, по данным Н.Н. Литвиновой [11], – олигоцен.

Горбушинская толща (P_3–N_{1gr}) в нижней части разреза по р. Горбуше представлена массивными мелкозернистыми песчаниками со скорлуповатой отдельностью, алевролитами с горизонтами карбонатных конкреций диаметром до 0.5 м, с линзами гравелитов и мелкогалечных конгломератов. В средней части разреза наблюдается ритмичное чередование песчаников, в нижней части гравийных, алевролитов, реже аргиллитов. Мощность прослоев не выдержана. Песчаники имеют плитчатую отдельность и содержат большое количество растительного детрита. В разрезе присутствуют линзовидные прослои диатомитов, спонголитов, туфодиатомитов, пепловых туфов. В этой части разреза наблюдаются подводно-оползневые дислокации (рис. 4а). Встречаются микститовые прослои, где в алевритовом матриксе распространены неокатанные обломки местных пород.

В верхней части разреза преобладают однородные не слоистые алевролиты, которые расслаиваются пачками флишоидного строения, где чередуются песчаники, алевролиты, аргиллиты. Редко появляются прослои гравелитов, мергелей, маломощные прослои углей, глауконитовых

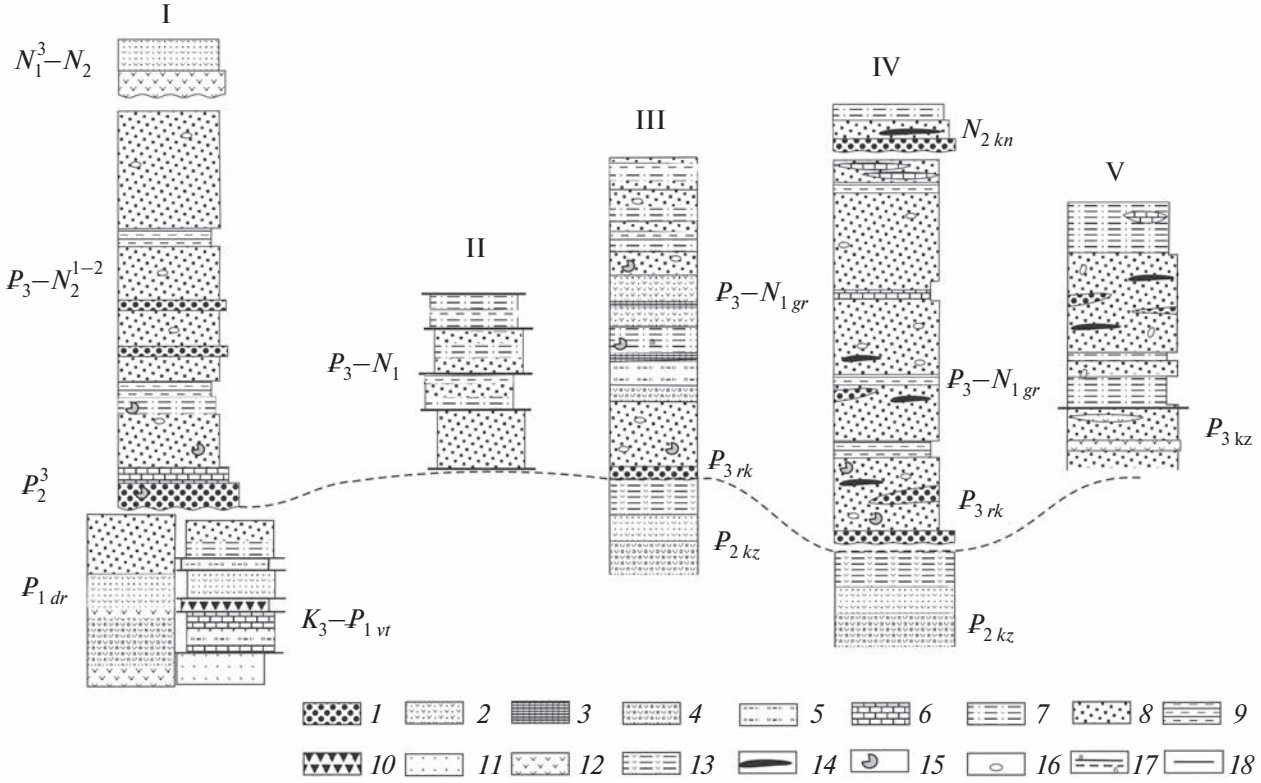

Рис. 3. Стратиграфические колонки отложений Тюшевского прогиба (составлены с использованием [4, 5, 10, 11, 14, 36]): *1* – конгломераты; *2* – туфопесчаники; *3* – диатомиты; *4* – туфоконгломераты; *5* – туфосилициты; *6* –известняки, песчанистые известняки; *7* – алевролиты; *8* – песчаники; *9* – аргиллиты; *10* – терригенный меланж; *11* – базальты; *12* – андезиты; *13* – туфоалевролиты; *14* – угли; *15* – фауна; *16* – галька; *17–18* – геологические границы: *17* – стратиграфические согласные (а), несогласные (б); *18* – тектонические. Цифры над колонками: I – Валагинский хребет; II–III – Кроноцкий п-ов (II – внутренняя зона, III – внешняя зона); IV – хр. Кумроч; V – Шипунский п-ов.

и органогенных туфопесчаников, пепловых туфов. По всему разрезу рассеяна “плавающая” галька размером от 1–2 см до 15 см. Общая мощность толщи не превышает 900–1000 м.

В составе обломков гравелитов и полимиктовых песчаников, представленных мелко-, средне- и грубозернистыми разностями, преобладают аргиллиты, диатомиты, кремнистые, карбонатные, глинисто-кремнистые породы. Реже в обломочной части встречаются милониты, кварциты, кремни, базальты, андезиты, дациты, серпентиниты, сланцы, углефицированный детрит. В обломочной части гравелитов отмечается значительное количество обломков кремнистых пород [11]. Породы часто содержат примесь растительного детрита, ракушечные фрагменты. Преобладающий размер обломков 0.1–0.8 см. Органогенные известняки состоят преимущественного из диатомовых, спикул губок и редких скелетов радиолярий. В известняках отмечается свежая пирокластика [11].

По данным [11], отложения горбушинской толщи развиты на п-ове Камчатский Мыс в бассейнах рек 1-я Перевальная и Пикеж. Они картируются в пределах маломощных тектонических пластин, но наблюдаются и стратиграфические контакты: на левобережье р. Пикеж и верховьях руч. Быстрый. Здесь отложения горбушинской толщи представлены мелкообломочными брекчиями, туфоалевролитами с прослоями карбонатных пород, аргиллитами с прослоями гравелитов. В некоторых местах в основании отмечаются конгломераты. Обломочный материал представлен преимущественно обломками местных пород, но присутствует и свежий пирокластический материал [9, 11]. Мощность толщи не постоянна и меняется от первых десятков метров до 600–700 м.

Центральный сегмент (Кроноцкий п-ов). Наиболее представительные выходы отложений Тюшевского прогиба известны в р-оне Кроноцкого п-ова в его западной, в бассейне рек Мал. Чажма и Тюшевка, и в южной (бухта Ольга) частях (см. рис. 1, 2). Здесь выделяются две структурные зоны: внутренняя, северо-западная, и внешняя, юго-восточная [5, 10, 38, 47]. Они разделяются региональной разломной зоной, известной как надвиг Гречишкина [5, 10, 16, 46]. Стратиграфические схемы, предлагаемые разными

Рис. 4. Фотографии обнажений кайнозойских отложений Тюшевского прогиба: (а) р. Горбуша (горбушинская свита); (б) верховья руч. Игорева (чажминская свита); (в) бухта Ольга (несогласное залегание ракитинской свиты на туфах кроноцкой сери); (г) р. Тюшевка (глыбовые конгломераты ракитинской (безымянноречeнской) свиты на контакте с туфами кроноцкой серии); (д) р. Ольга (ракитинская свита).

исследователями, проводившими здесь работы, противоречивы, что во многом связано с труднодоступностью территории, со сложным тектоническим строением района и схожестью литологического состава осадочных комплексов [3, 5, 6, 10, 16, 30]. Наши работы в 1994 и 1999 гг. позволили уточнить возраст и соотношение выделяемых толщ, а также условия накопления, и определить направление сноса обломочного материала [36, 47, 50, 51].

Во внутренней зоне обнажаются наиболее древние и интенсивно деформированные верхнеэоценовые и олигоцен-миоценовые толщи (см. рис. 2). По данным [10], здесь выделяются тундровская (P_{2tn}), чажминская (P_{3cz}) и богачесвская (P_3–N_{1bg}) свиты. Во внешней зоне породы

слабо деформированы и представлены фациально изменчивыми, полифациальными отложениями ракитинской (P_{3rk}) и горбушинской толщ (P_3–N_{1gr}).

Внутренняя зона. Отложения тундровской (P_{2tn}) свиты обнажаются в Чажминском хребте в верховьях ручьев Игривый и Бориса. Они представлены песчаниками, туфопесчаниками, гравелитами, алевролитами, ариллитами, реже конгломератами, известняками и прослоями пепловых туфов. Повсеместно присутствует растительный детрит, прослои углей и, редко, карбонатные стяжения [5, 10, 36, 47]. В целом вверх по разрезу наблюдается утонение обломочного материала. В данном районе отложения тундровской свиты разбиты на тектонические пластины мощностью до 100 м. Внутри пластин отложения интенсивно дислоцированы, наблюдаются изоклинальные складки, запрокинутые к северо-западу, а в основании пластин – тектонический меланж, будинаж и рассланцевание пород. Вероятно, имеют место сдваивания разреза. Нами наблюдались такие особенности строения разреза в средней части руч. Игривый (см. рис. 2, 4б).

Основание разреза не обнажается, вверх по разрезу наблюдается постепенный переход к отложениям чажминской свиты. Общая мощность тундровской свиты не превышает 1500 м. Обломочный материал представлен галькой пород и обломками пирокластики. Обломочный материал хорошо окатан и сложен базальтами, андезитами, песчаниками, алевролитами, аргиллитами, кремнями. Единичные обломки представлены долеритами, габбро, туффитами, кварцитами, микрокварцитами.

Возраст толщи по комплексу органических остатков определяется как эоцен, а в верхних частях разреза как поздний эоцен–ранний олигоцен [10].

Чажминская свита (P_{3cz}) картируется на восточном склоне Чажминского хребта в бассейне ручьев Игорева, Игривый и Бориса и р. Бол. Чажма и сложена конглобрекчиями, конгломератами, гравелитами, гравийными песчаниками, песчаниками, алевролитами, аргиллитами, присутствуют прослои пепловых туфов, мергелей, глауконитовых песчаников [10]. Мергели образуют прослои и линзы. В толще, наряду с интенсивными дислокациями, наблюдаются структуры оползания. Мощность толщи около 1100 м. Обломочный материал представлен в разной степени окатанным (от окатанных до угловатых) галечным и мелко валунным материалом. Состав обломочного материала близок к таковому тундровской свиты, отмечается присутствие среди обломков кремнистых и ультраосновных пород [9, 10].

Богачевская свита (песчаниковая толща по [5]), распространена в верховьях рек Ольга, Татьяна, Тюшевка и Малая Чажма. По данным [9, 10], она разделяется на две подсвиты. В нижней подсвите преобладают пачки чередования алевролитов, туфоалевролиов, песчаников, галуконитовых песчаников, туффитов, диатомитов, органогенных пород. Отмечаются также прослои пепловых туфов, кремней, глинисто-кремнистых пород, аргиллитов, кремнисто-карбонатных пород, гравелитов и конгломератов. Гравелиты и мелкогалечные конгломераты образуют преимущественно линзовидные прослои. Мощность подсвиты составляет около 1000 м. В верхней подсвите в основании залегают песчаники с линзами конгломератов, по всей толще распределен растительный детрит и прослои углей. Мощность составляет около 1300 м. Возраст толщи по комплексу фауны определяется как олигоцен-миоценовый [10].

Внешняя зона. Ракитинская толща сильно фациально изменчива, мощность ее меняется от нескольких м до 500–600 м (см. рис. 2, 3, 4в). Она с угловым несогласием и размывом залегает на породах эоценовой козловской свиты (P_{2kz}) кроноцкой серии Кроноцкого п-ова и, вероятно, песчано-алевролитовой пачке богачевской? свиты [2, 3, 10, 36]. Как отмечалось [3], в различных местах выходов отложений ракитинской толщи состав пород толщи различается; так в бассейне р. Волчья (см. рис. 4г) широко распространены грубые конгломератовые пачки (свита Горячих ключей, безымянноречeнская, по [3, 10]). Отложения свиты в бассейне р. Ракитинской представлены в нижней части средне- и мелкогалечными конгломератами, песчаниками с рассеянной галькой эффузивов и обломками раковин моллюсков, ракушняками и опоками, в некоторых разрезах наблюдается, выше песчанистой пачки, чередование опок (2–3 м) и массивных песчаников (1–3 м), содержащих гальку эффузивов и карбонатные конкреции. Вверх по разрезу толща наращивается песчаниками с прослоями гравелитов. Возраст по комплексу фауны, микрофауны и нанопланктону определяется как олигоценовый [3, 36].

Отложения горбушинской толщи протягиваются полосой от нижнего, среднего течения рек Татьяна и Ольга до рек Малая и Большая Чажма (см. рис. 4д).

Они представлены песчаниками с валунами и галькой, алевролитами с прослоями песчаников, флишоидным переслаиванием алевролитов, песчаников, туфопесчаников, в верхней части

разреза появляются прослои аргиллитов и диатомитов. В толще отмечаются маломощные прослои кислых туфов. В разрезе присутствуют карбонатные конкреции и растительный детрит. Строение толщи отличается монотонностью и имеет флишоидный характер. Слои полого падают в западных румбах. Мощность толщи 1500–2000 м.

Западный сегмент (Валагинский хребет). Комплексы западного борта прогиба известны в бассейнах верховий рек Китильгина, Мальцевская, Корниловская, Лев. Жупанова (Валагинский хребет), где они несогласно перекрывают образования Ветловского террейна и тальниковской свиты (Ачайваям-Валагинского террейна) (рис. 2, 5). По данным [4], в основании разреза картируется маломощная туфоаргиллито-песчаниковая толща среднеэоценового возраста. Она представлена в нижней части линзовидным горизонтом мелкогалечных конгломератов, гравелитов, песчаников, которые вверх по разрезу сменяются граувакковыми песчаниками и алевритистыми аргиллитами. В песчаниках присутствует большое количество раковин моллюсков, которые часто образуют ракушняки [4, 14, 19].

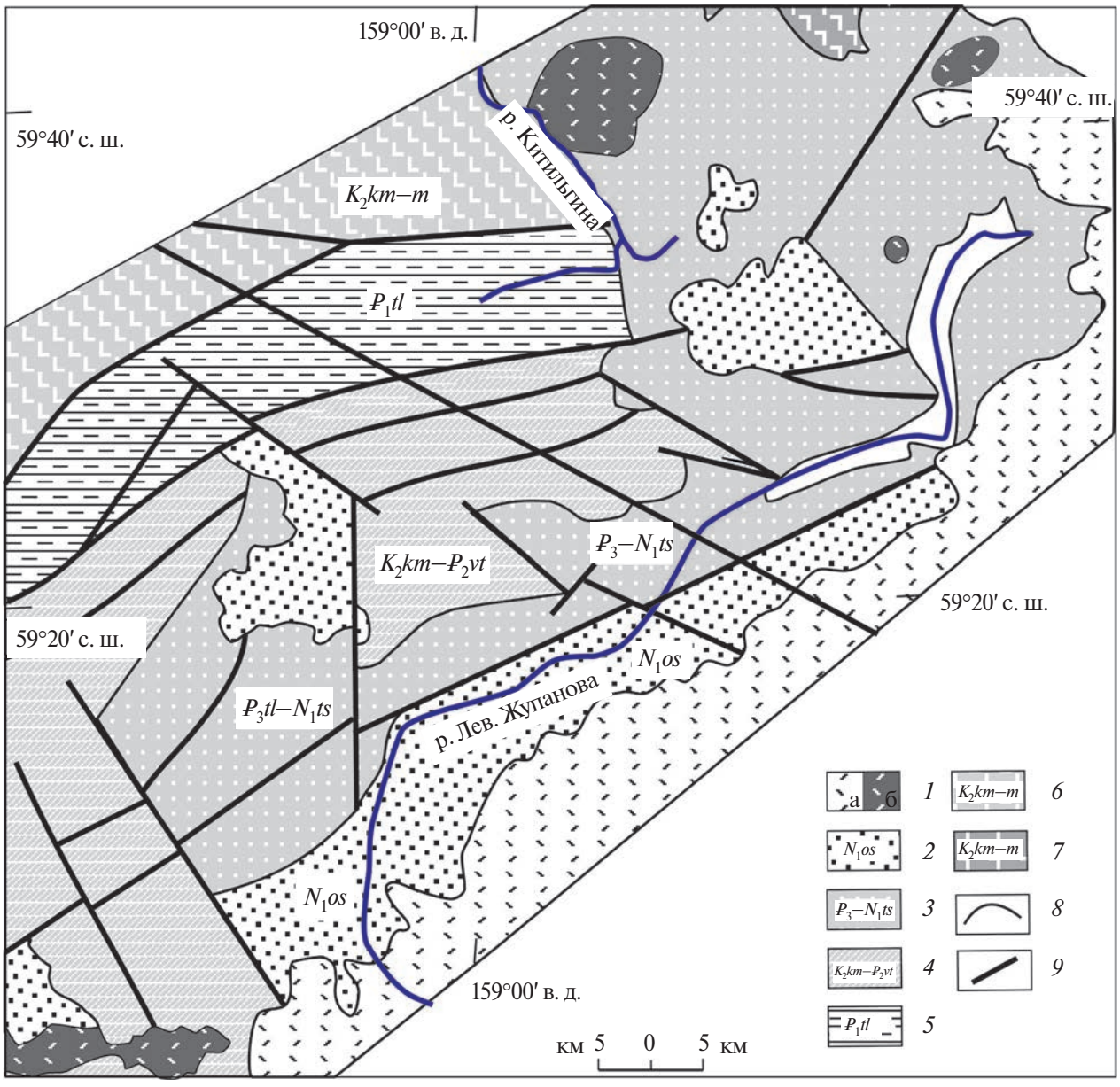

Рис. 5. Геологическая схема западного сегмента Тюшевского прогиба (составлена с использованием [4, 12, 15, 19]): *1* – образования Восточно-Камчатского вулканического пояса: (а) эффузивы; (б) субвулканические тела; *2* – осиповская свита; *3* – тюшевская серия; *4* – Ветловский комплекс; *5–7* – комплексы Ачайваям-Валагинского террейна, свиты: *5* – тальниковская; *6* – китительгинская; *7* – попутновская; *8* – геологические границы; *9* – разломы.

Стратиграфически выше залегают терригенные породы тюшевской серии (P_3–N_{1ts}) и осиповской свиты (N_{1os}).

В основании разреза тюшевской серии развиты в основном грауваковые песчаники с многочисленными линзами гравелитов и валунно-галечных конгломератов. Выше залегает пачка переслаивания туфопесчаников, алевролитов, аргиллитов, которые содержат прослои туффитов и стяжения песчанистых известняков, известковых песчаников и алевролитов. Вся толща содержит "плавающую" гальку и маломощные линзы гравелитов, гравийных песчаников и конгломератов. Здесь также встречаются раковины моллюсков, морских ежей и мелкий углистый детрит. В линзах и стяжениях известковистых пород, по данным [14], присутствуют многочисленные раковины фораминифер. Возраст этой толщи устанавливается как ранне-среднемиоценовый [14]. Мощность разреза достигает 500–600 м.

Состав обломочного материала в конгломератах, гравелитах, песчаниках – выдержанный и близкий по составу. Он представлен, по данным [14], хорошо и средне окатанными обломками базальтов, андезитов, туфов основного состава, разноцветными кремнями, диоритами, песчаниками, алевролитами, также присутствуют обломки гнейсов, плагиогранитов, кремнистых известняков.

Южный сегмент (Шипунский п-ов, р. Вахиль). На юге вещественные комплексы Тюшевского прогиба объединяются в тюшевскую серию [24] и обнажаются в р-оне Крестьянских гор, в междуречье руч. Олений и р. Правый Вахиль, а также картируются в пределах отдельных обнажений по левому борту р. Вахиль (см. рис. 2, 3). Они с несогласием и размывом залегают на вулканогенно-туфогенных образованиях козловской и кубовской свит кроноцкой серии и перекрываются миоценовыми вулканитами шелковского вулканического комплекса ВКВП [24]. В бассейне руч. Олений и устьевой части р. Вахиль на отложения тюшевской серии надвинуты образования ветловского комплекса. В основании разреза тюшевской серии (р. Правый Вахиль) залегают валунные конгломераты (до 15 м), которые сменяются грубо и среднезернистыми песчаниками. Обломочный материал хорошо и средне окатан и представлен преимущественно обломками подстилающих пород кроноцкой серии. Выше разрез наращивается пачкой переслаивания песчаников и алевролитов. В отложениях серии по всему разрезу присутствует "плавающая" галька, растительный детрит, карбонатные конкреции и многочисленные остатки макрофауны. Встречаются прослои мелкогалечных конгломератов и гравелитов и песчанистых органогенных известняков. Обломочный материал состоит преимущественно из обломков пород, но присутствует в значительном количестве кристаллокластика, обломки пемзы и вулканического стекла. Обломки пород представлены глинистыми сланцами, кремнистыми породами, микрокварцитами, андезитами, базальтами, туфами. В гравелитах присутствуют хорошо окатанные обломки диоритов. В органогенных известняках наблюдается примесь терригенных пород, растительного детрита, а также "плавающая" галька и обломки раковин моллюсков. Нижние горизонты тюшевской серии датируются по комплексу фауны и фораминиферам олигоценом, а средние и верхние – границей олигоцена–миоценом или ранним миоценом [24]. Выделенный из отложений палинокомплекс позволяет говорить о потеплении в конце раннего миоцена [24].

Основные черты структуры. Северо-западный борт прогиба преимущественно имеет тектонические контакты с породами Ветловского террейна. Эта граница представлена системой сближенных чешуйчатых надвигов и взбросов с общей северо-западной вергентностью и углами падения 20–40°. И только в пределах Валагинского хребта (в верховьях р. Корниловской) наблюдаются как стратиграфические, так и тектонические контакты с диабазовой толщей Ветловского террейна и тальниковской свитой Ачайваям-Валагинского террейна [4, 12, 15, 19].

Отложения юго-восточного борта преимущественно имеют стратиграфический контакт с нижележащими комплексами Кроноцкого террейна. Наблюдается несогласное с размывом и часто с конгломератами в основании залегание олигоцен-миоценовых отложений на эоценовых вулканогенно-осадочных комплексах кроноцкой серии.

Внутренняя структура отложений тюшевского прогиба различается в северо-западной и юго-восточной частях (см. рис. 2). Особенно хорошо это проявилось в центральном секторе на Кроноцком перешейке. Тундровская и чажминская свиты разбиты на системы маломощных пластин чешуйчатыми надвигами мощностью от первых сотен метров до 1.5 км. Падение плоскости надвига 40–50° в северо-западном направлении (Аз.п.320°) [47]. Внутренняя структура в пластинах также различается, наблюдается как моноклинальное залегание пород, так и сжатые лежачие и запрокинутые складки преимущественно с общей вергентностью к юго-востоку

[5, 47]. В целом степень дислоцированности пород средняя (в отличие от пород Ветловского террейна), а будинаж пород проявляется только вблизи крупных разломов.

Для отложений внешней части характерно преимущественно пологое залегание пород 10–40° с падением в западных румбах, нарушенное сбросами, взбросами и сдвигами.

Ранее был проведен анализ структурных и седиментологических особенностей строения отложений Тюшевского бассейна в хр. Кумроч и на Кроноцком п-ове [47–49]. Было показано, что деформации происходили в верхней части коры с низкой степенью метаморфизма (цеолитовая фация) с температурами 100–230°С и давлением до 2 кбар [49]. Поля палеонапряжений, измеренные в северо-западной части Тюшевского прогиба, показывают сжатие в направлении СЗ–ЮВ. На северо-западном борту Тюшевского прогиба тензор сжатия, по данным [47], показывает погружение в юго-восточном направлении под углом 40°. В пределах Чажминского хребта этот этап может быть датирован как поздний эоцен [5]. Деформации продолжались и позже в олигоцене, что подтверждается перерывом в осадконакоплении в это время.

Для всех толщ характерны конвективные дислокации, нарушения первичной слоистости [22, 47]. Они выражены в появлении диапиров, волнистом изгибании слоев, следов волочения, структур ряби, косой слоистости, а также складок оползания.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕЩЕСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Анализ отложений Тюшевского прогиба показывает, что здесь развиты преимущественно полифациальные прибрежно-морские и турбидитовые отложения позднеэоценового, олигоцен-среднемиоценового возраста. При этом наиболее древние эоценовые комплексы выделяются в западной части бассейна. Для эоценовых пород характерно присутствие в нижних горизонтах прослоев и линз, сложенных конгломератами, гравелитами, которые вверх по разрезу сменяются алевролитами и аргиллитами. Обломочный материал чаще всего хорошо окатан и сложен преимущественно обломками местных нижележащих пород. В работе [26] был проведен минералогический и геохимический анализ пород, развитых в пределах Кроноцкого перешейка. По данным [26], отложения тундровской свиты эоценового возраста относятся к грауваккам (по классификации В.Д. Шутова) с низким содержанием кварца и являются вулканомиктовыми, которые образовались при разрушении островодужных сооружений. Изученные ими породы Тюшевского прогиба по химическому составу отличаются от большинства известных малокварцевых отложений. В них отмечается повышенные содержания SiO_2 и отношения щелочей, низкое содержание TiO_2. Содержание редких элементов, а также минеральный состав также не характерен для составов пород с низким содержанием кварца. Такие особенности отложений Тюшевского прогиба позволяют говорить, что в обломочной части присутствует материал континентального происхождения [26]. Также было показано, что доля кислых и метаморфических пород в песчаниках вверх по разрезу уменьшается. Кислые и метаморфические породы известны в пределах Срединного хребта и на Шипунском п-ове, где возраст габбро-гранодиоритового массива составляет 56–44 млн л. [40].

Для Валагинского хребта в отложениях Тюшевского прогиба намечается фациальная изменчивость, которая более характерна для нижних частей разреза, где преобладают более грубообломочные разности, которые вверх по разрезу и в северо-восточном направлении сменяются более тонкозернистыми породами (переслаивание песчаников, алевролитов, аргиллитов). Это отражается и в составе фауны [14]. Фауна, содержащаяся в средней и верхней частях разрезов, в наиболее тонкозернистых породах (алевролиты, аргиллиты, мелкозернистые песчаники), позволяет предполагать, что накопление этих пород происходило в относительно глубоководных условиях, главным образом, в обстановке нижней сублиторали или низов верхней сублиторали [14]. Это были спокойные затишные воды с нормальной соленостью и умеренным температурным режимом. Фауна, содержащаяся в грубообломочных породах (конгломераты, гравелиты, песчаники) нижних частей разреза, свидетельствует об относительном мелководье, более подвижной водной среде, с лучшей аэрацией и более высокими температурами. Эти разрезы более характерны для юго-западных частей разреза. Предполагается [14], что отложения Тюшевского прогиба Валагинского хребта (западного сектора) накапливались в различных фациальных условиях, как мелководья, так и относительно глубоководных условиях.

Авторы работы [14] показывают, что фаунистические комплексы Валагинского хребта имеют много общих черт с фауной Кроноцкого

района (центральный сегмент), которые наблюдались в ракитинской толще и тюшевской серии на Кроноцком п-ове, т. е. на восточной борту прогиба. Отмечается и определенное сходство фауны с комплексами из отложений Западной Камчатки.

Проведенное ранее [47, 48, 50] изучение структурных особенностей осадочных пород (косой слоистости, мелкой складчатости течения, структур волочения) показало, что обломочный материал поступал в бассейн преимущественно с запада и северо-запада с позднего эоцена по средний миоцен. И только на ранних этапах накопления тюшевской серии, по данным [50], небольшой объем обломочного материала поступал с Кроноцкого террейна, с восточных, юго-восточных румбов.

Для отложений северного сегмента Тюшевского прогиба, развитых в бассейне р. Горбуша (миоцен), по данным измерений по направлению палеотечений и транспортировки обломочного материал определяется направление палеосклона на восток (94°), а разнос обломочного материала происходил в северо-восточном направлении. Отложения нижней части разреза накапливались в верхней части склона, возможно, на террасовидном уступе. Как следует из анализа обломочного материала, областью размыва для этих пород этого сегмента служили вулканогенно-туфогенные и терригенные образования Ачайваям-Валагинского и Ветловского террейнов [47]. Можно предполагать, что выявленный снос обломочного материала с запада для турбидитов горбушинской свиты, которые накапливались в этом сегменте, вероятно, вблизи восточного борта Тюшевского прогиба, может свидетельствовать о том, что комплексы Кроноцкого террейна уже являлись частью Камчатской окраины. Об этом также свидетельствуют обнажающиеся на п-ове Камчатский сходные отложения этого возраста. Вероятно, Восточные п-ова Камчатки в миоцене представляли собой гряду островов.

Фациально-генетический анализ толщ Тюшевского прогиба, проведенный Н.П. Кураленко [22], показал, что здесь выделяются как мелководно-морские, а возможно и континентальные отложения, преимущественно развитые на бортах прогиба. В центральных частях развиты относительно более глубоководные отложения, где накапливались фоновые, тонкозернистые алеврито-глинистые и диатомовые осадки, которые расслаивают отложения различных гравитационных потоков. Среди них им были выделены как микститовые накопления подводных оползней и песчано-галечные и валунные осадки грязекаменных потоков, мощностью до 5–8 м, а также прослои низкоплотностных потоков алевро-пелитового состава. Обломочный материал в них представлен как хорошо окатанным, так и угловатым обломочным материалом. Вверх по разрезу начинают более заметную, а затем и преобладающую роль играть низкоплотностные фоновые потоки, но в составе обломочного материала возрастает роль пирокластического и вулкано-терригенного материала. А наличие большого количества углефицированного растительного материала показывает, что источником материала продолжали оставаться приустьевые мелководные участки дельт рек [22].

Для восточной части прогиба можно предполагать сочетание глубоководных флишоидных отложений с дельтовыми образованиями, а для западной части дельтовые и прибрежно-морские осадки известны только в низах разреза.

По особенностям состава и строения большая часть отложений Тюшевского прогиба может быть отнесена к проксимальным турбидитам, для которых характерна большая мощность слоев, часто неправильная линзовидная слоистость, также характерны срезания слоев; преобладают грубо- и крупнозернистые породы (грубозернистые песчаники, гравелиты, конгломераты) с небольшим количеством маломощных прослоев алевролитов и аргиллитов; контакты слоев преимущественно неровные, резкие, практически отсутствуют следы биотрубации.

И только в верхах разреза для горбушинской и тюшевской толщ можно говорить, что часть из них относится к дистальным турбидитам. Для них характерно равномерное чередование песчаных и алевро-аргиллитовых прослоев, хорошо выраженная слоистость, присутствует косая и волнистая слоистость, обычны мелкие биотурбации, структуры нагрузки, диапиры.

Анализ обломочного материала и состава осадочных пород [5, 26, 50] позволил сделать вывод, что наряду с местным островодужным материалом присутствуют обломки, характерные для пород континентальной или субконтинентальной коры.

Структурные особенности пород эоценового и миоценового возраста (гиероглифы, косая слоистость, конседиментационные складки) показывают, что поступление осадочного материала происходило с запада и юго-запада [47]. Наличие туфового материала в разрезе [5, 9, 10, 11, 25, 26] подтверждает, что на осадконакопление в нем оказывал влияние Центрально-Камчатский вулканический пояс.

Принципиальным является вопрос о ширине, глубине и времени заложения Тюшевского бассейна.

Данные [22, 47, 50] о поступлении обломочного материала как с востоных, так и с западных направлений для эоценовых и олигоцен–среднемиоценовых отложений подтверждают точку зрения о формировании Тюшевского прогиба “in situ” и позволяют связывать его эволюцию с формированием Камчатской окраины. Такая интерпретация также поддерживается схожестью составов пород Тюшевского прогиба и Центрально-Камчатской депрессии [14, 22]. Имеющиеся данные, на наш взгляд, позволяют предполагать, что формирование бассейна как единой структуры могло начаться с позднего эоцена. К этому времени произошла смена глубоководного осадконакопления в окраинноморском бассейне (Ветловский террейн) на мелководное морское в преддуговом бассейне [39, 47]. Для миоцена можно предположить, что ширина этого бассейна не превышала сотни километров и возможно различалась по простиранию. В это время Тюшевский прогиб, вероятно, представлял собой преддуговой бассейн [47], сформировавшийся при изгибании литосферы после начала аккреции Кроноцкого террейна.

О глубине бассейна есть различные мнения, так в работе А.В. Родникова с соавторами [30] отмечается, что это было не глубокое море, до 400 м глубиной. Б.В. Ермаков и О.И. Супруненко [18] проводят сравнение состава отложений Тюшевского прогиба с породами предуральского прогиба, изученного И.В. Хворовой, и предполагают, что глубина бассейна могла достигать 500–800 м.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Геодинамическая природа Тюшевского бассейна до настоящего времени дискуссионна [1, 5, 11, 20, 21, 23, 32, 38, 45, 47]. Авторы, которые опираются на палеомагнитные данные, считают, что отложения восточного борта Тюшевского прогиба накапливались на краю Кроноцкого террейна палеоостроводужной природы на значительном расстоянии от Камчатской окраины, а породы западного борта формировались на Камчатской окраине на комплексах Ачайваям-Валагинского террейна, входившего в аккреционную структуру этой окраины. Отложения восточного и западного борта Тюшевского прогиба разделялись океаническим или крупным окраинноморским бассейном, а затем были совмещены при аккреции Кроноцкого террейна в позднем миоцене или плиоцене [5, 20, 21, 23, 32]. Согласно подходу, основанному на геологических данных [1, 11, 26, 38, 45, 47], прогиб образовался “in situ” как унаследованный или преддуговой бассейн.

К фактам, которые позволяют придерживаться второй точки зрения, относятся:

1. Состав обломочного материала, где, наряду с обломочным материалом островодужных террейнов, присутствуют обломки метаморфических пород.

2. Структурные особенности пород как западного, так и восточного бортов прогиба, которые указывают, что поступление осадочного материала преимущественно происходило с запада и юго-запада.

3. Транспортировка материала осуществлялась крупными палеоречными системами и различными автокинетическими потоками.

4. Присутствие туфовых прослоев, которое указывает, вероятно, на влияние на осадконакопление вулканизма Центрально-Камчатского вулканического пояса.

5. Сходный состав пород Тюшевского прогиба и Центрально-Камчатской депрессии.

6. Близкий видовой состав фауны западного и восточного бортов прогиба и сходство этих комплексов с Западно-Камчатскими фаунистическими комплексами [14, 25].

7. Отсутствие в разрезах вулканитов, близких по составу к океаническим базальтам, и пелагических осадочных пород.

Особенности строения и состава вещественных комплексов Тюшевского прогиба позволяют нам рассматривать этот бассейн как сформированный и развивающийся “in situ” на месте Ветловского бассейна окраинноморской природы. Временем начала формирования этой структуры, вероятно, можно считать поздний эоцен–олигоцен, после закрытия Ветловского бассейна. В это время накапливались преимущественно грубые прибрежно-морские и/или дельтовые отложения, которые в дальнейшем сменились более глубоководными флишевыми. Ширина Тюшевского бассейна в олигоцен–раннемиоценовое время, вероятно, не превышала сотни километров.

Итак, можно предложить следующий сценарий формирования и развития Тюшевского бассейна (рис. 6). В эоцене прекращается вулканическая деятельность в Кроноцкой дуге и начинается закрытие Ветловского окраинноморского бассейна при аккреции Кроноцкого островодужного террейна. На его западном борту продолжают накапливаться терригенные и туфотерригенные образования (тундровская толща). Нижние

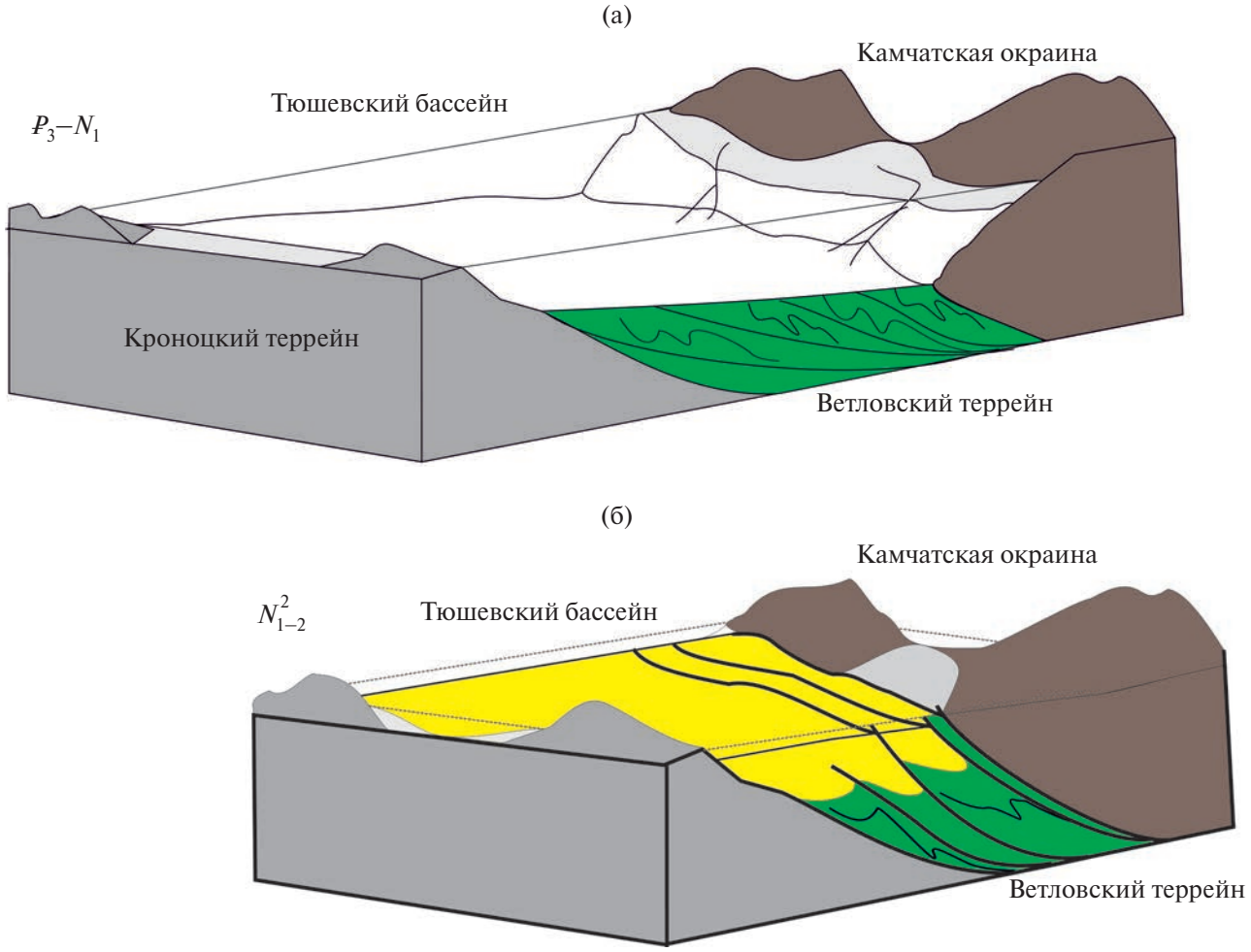

Рис. 6. Блок-диаграмма развития Тюшевского бассейна для: (а) олигоцен-раннемиоценового; (б) позднемиоценового-плиоценового времени.

горизонты вещественных комплексов Тюшевского бассейна, начиная с олигоцена, накапливаются и заполняют остаточный бассейн; наблюдается фациальная смена отложений от бортов бассейна к его центральным частям, от грубых толщ к преимущественно флишевым комплексам, расслоенных фоновыми отложениями открытых бассейнов. Турбидитовые потоки разной плотности приносили осадки в центральные части бассейна, а в прибрежных районах накапливались фациально изменчивые отложения, отражавшие состав подстилающих толщ. Бортами бассейна в это время выступали комплексы Ачайваям-Валагинского террейна, которые входили в структуру Камчатской окраины и Кроноцкого террейна. Этот бассейн осадконакопления сообщался с бассейнами Центральной и Западной Камчатки и с открытым океаном, что подтверждается фаунистическими комплексами [2, 36].

Вероятно, образования Кроноцкого террейна в это время формировали отдельные острова (островную цепь) и через проливы сообщались с водами Тихого океана.

Процесс аккреции Кроноцкого террейна хорошо коррелируется с возрастом эксгумации осадочных комплексов Тюшевского бассейна, которые были выявлены при датировании возраста апатитов из осадочных комплексов [42], начиная с олигоценового времени и заканчивая плиоценом (табл. 1).

Таблица 1. Время эксгумации вещественных комплексов Тюшевского прогиба

Регион	Олигоцен – поздний эоцен	Средний – ранний миоцен	Поздний миоцен	Плиоцен
хр. Кумроч	24.1–29.9 млн л.	10.2–15 млн л.		3.8–4.8 млн л.
п-ов Кроноцкий	19.3–21.5 (31.6–45.8) млн л.	11.4–15.4 млн л.	6.2–8.6 млн л.	4.6–5.1 млн л.

Процесс аккреции проходил не единовременно, а периодами, что подтверждается временем эксгумации различных комплексов Тюшевского бассейна [42]. Эти этапы фиксируются в олигоцен-раннемиоценовое и ранне-среднемиоценовое время. Они отражают продолжающуюся коллизию Кроноцкого островодужного террейна с Камчатской окраиной. При этом формируется крупный региональный надвиг Гречишкина [5, 34, 35, 46]. С этим интервалом связано образование современной структуры Камчатки и заложение современной субдукционной зоны. Возрастной интервал позднего миоцена (6.2–8.6 млн л.), обусловлен, вероятно, начавшейся субдукцией Тихоокеанской плиты под современную Камчатскую окраину и активным воздыманием Кроноцкого террейна и внешнего края Камчатской окраины, приведший к осушению Тюшевского бассейна. Этот процесс, видимо, можно связать с началом пододвигания в Камчатскую зону субдукции возвышенности Обручева северо-западного фланга Гавайско-Императорских подводных гор.

Самые молодые возрастные датировки апатитов (3.3–5.1 млн л.) отражают плиоценовый этап взаимодействия Тихоокеанской плиты и Камчатской окраины, продолжающееся поднятие Восточно-Камчатских хребтов, связанное с коллизией Камчатскомысского сегмента Кроноцкого террейна и раскрытием Центрально-Камчатской депрессии.

Таким образом, можно утверждать, что отложения накапливались в Тюшевском морском бассейне с позднего эоцена по средний миоцен. Здесь формировались прибрежно-морские и флишевые отложения, материал которых поступал из дельтовых частей крупных рек.

Источником обломочного материала служили вулканогенно-осадочные комплексы Ветловского, Кроноцкого и Ачайваям-Валагинского террейнов.

Тюшевский морской бассейн развивался как унаследованный и, вероятно, имел сообщение с бассейнами Центральной и Западной Камчатки и с Тихим океаном. Данные по возрасту апатитов позволяют предполагать, что коллизионные процессы происходили как во время формирования бассейна, так и продолжались в позднем миоцене и плиоцене.

Благодарности. Автор выражает признательность рецензентам за полезные комментарии и замечания и редактору за тщательное редактирование.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН № FMWE-2024-0018 (ИО РАН им. П.П. Ширшова).

Конфликт интересов. Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аккреционная тектоника Восточной Камчатки / Отв. ред. Ю.М. Пущаровский. М.: Наука, 1993. 272 с.
2. *Арсанов А.С.* Палеогеография Восточной Камчатки в миоцене // Бюл. МОИП. Отд. Геол. 1973. Т. 78. № 3. С. 142–143.
3. *Арсанов А.С.* Опыт естественного стратиграфического расчленения разреза олигоцен-миоценовых отложений Кроноцкого района Восточной Камчатки // Проблемы стратиграфии и исторической геологии. М.: Изд. Московского государственного университета, 1978. С. 181–191.
4. *Бахтеев М.К., Беньямовский В.Н., Брагин Н.Ю., Витухин Д.И.* Новые данные по стратиграфии мезозоя и кайнозоя Восточной Камчатки (Валагинский хребет) // Стратиграфия и геологическая корреляция. 1994. Т. 2. № 6. С. 77–84.
5. *Бахтеев М.К., Морозов О.А., Тихомирова С.Р.* Строение безофиолитового коллизионного шва Восточной Камчатки – зоны надвига Гречишкина // Геотектоника. 1997. № 3. С. 74–85.
6. *Белова М.Б., Васильев В.Г., Власов Г.М. и др.* Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Камчатки. М.: Гостоптехиздат, 1961. 344 с.
7. *Беньямовский В.Н., Фрегатова Н.А., Спирина Л.В. и др.* Зоны планктонных и бентосных фораминифер в палеогеновых отложениях Восточной Камчатки // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1992. № 1. С. 100–113.
8. *Бескровный Н.С., Берсон Г.Л., Гурко Н.Н. и др.* Новые данные о перспективах нефтегазоносности Восточной Камчатки // Советская Геология. 1971. № 4. С. 114–121.
9. *Бояринова М.Е.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Восточно-Камчатская. Лист N-57-XII, XVIII, N58-VII (гора Исток Чажмы) / Ред. А.И. Поздеев. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006.
10. *Бояринова М.Е., Вешняков Н.А., Коркин А.Г. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Восточно-Камчатская. Листы N-57-XII, XVIII, N-58-VII (г. Исток Чажма). Объяснительная записка / Ред. Б.А. Марковский. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006. 223 с.
11. *Бояринова М.Е., Вешняков Н.А., Коркин А.Г., Савельев Д.П.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Восточно-Камчатская. Листы 0-58-XXVI, XXXI,

XXXII. Объяснительная записка / Ред. Б.А. Марковский. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 267 с.

12. Геологическая карта и карта полезных ископаемых Камчатской области и Корякского автономного округа. Масштаб 1:1 500 000 / Гл. редакторы: А.Ф. Литвинов, Б.А. Марковский, В.П. Зайцев. СПб.: ВСЕГЕИ, 2005.
13. Геология СССР. Камчатка и Командорские острова. Том XXXI. М.: Гостоптехиздат, 1964. 743 с.
14. *Гладенков Ю.Б., Цикунов А.Г.* Стратиграфия неогеновых отложений Восточной Камчатки (Валагинский хребет) // Известия Академии наук СССР. 1966. Сер. Геологическая. № 5. С. 105–117.
15. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Лист N-57. Масштаб 1:1 000 000 / Гл. редакторы: А.Ф. Литвинов, Б.А. Марковский. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006.
16. *Гречишкин Л.А.* Геологический очерк восточного побережья Камчатки (Усть-Камчатск – Петропавловск) // Труды НГРИ. 1935. Сер. А. Вып. 72. 43 с.
17. *Двали М.Ф.* Геологическое строение и нефтеносность Восточной Камчатки. Л.: Гостоптехиздат, 1955. 268 с.
18. *Ермаков Б.В., Супруненко О.И.* Строение и условия формирования позднемеловых и миоценовых образований Корякско-Камчатской области // Советская Геология. 1975. № 12. С. 53–65.
19. *Зинкевич В.П., Федорчук А.В., Цуканов Н.В.* Аккреционная тектоника юга Валагинского хребта (Восточная Камчатка) // Геотектоника. 1992. № 3. С. 64–78.
20. *Кононов М.В.* Тектоника плит северо-запада Тихого океана. М.: Наука, 1989. 168 с.
21. *Константиновская Е.А.* Тектоника Восточных окраин Азии: структурное развитие и геодинамическое моделирование. М.: Научный Мир, 2003. 224 с.
22. *Кураленко Н.П., Хвост Т.Л.* Конвективные дислокации в турбидитах богачевской и тюшевской серий Восточной Камчатки // Литология и полезные ископаемые. 1991. № 3. С. 30–38.
23. *Левашова Н.М., Шапиро М.Н., Беньямовский В.Н., Баженов М.Л.* Реконструкция тектонической эволюции Кроноцкой островной дуги (Камчатка) по палеомагнитным и геологическим данным // Геотектоника. 2000. № 2. С. 65–84.
24. *Литвинов А.Ф., Крикун Н.Ф.* Государственная Геологическая карта м-ба 1: 200 000. листы N-57-XXII, XXVIII, XXIX. Объяснительная записка. М.: Недра, 1992. 180 с.
25. *Маркевич П.В.* Флишевые формации Северо-Западной части Тихоокеанского складчатого пояса. М.: Наука, 1978. 143 с.
26. *Морозов О.А., Ростовцева Ю.В.* Минералогия и геохимия песчаников Восточной Камчатки и Командорских островов // Литология и полезные ископаемые. 1996. № 1. С. 44–55.
27. *Парфенов Л.М., Натапов Л.М., Соколов С.Д., Цуканов Н.В.* Террейны и аккреционная тектоника Северо-Востока Азии // Геотектоника. 1993. № 1. С. 68–78.
28. *Плешаков И.Б., Несвит Д.С.* Новые данные по геологии и нефтеносности Кроноцкого района восточного побережья Камчатки // Геология и геохимия. 1958. Вып. 2 (8). С. 231–245.
29. *Попруженко С.В., Аносов Г.И., Апрелков С.Е.* Перспективы нефтегазоносности Восточной Камчатки (Тюшевский прогиб) // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики. Магадан, 2003. Т. 2. С. 52–54.
30. *Родников А.Г. Родникова Р.Д., Севостьянов К.М.* О среднемиоценовой флишевой формации в области кайнозойской складчатости на Дальнем Востоке // Советская геология. 1969. № 6. С. 24–29.
31. *Садреев А.М., Хромов В.Т.* Опыт послойного сопоставления разрезов ритмичных среднемиоценовых отложений Кроноцкого перешейка (Восточная Камчатка) // Бюллетень МОИП. Отд. Геологии. 1963. Т. XXXVIII. № 6. С. 106–113.
32. *Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Издательство Кам. ГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.
33. *Соколов С.Д.* Очерк тектоники Северо-Востока Азии // Геотектоника. 2010. № 6. С. 60–78.
34. *Соловьев А.В.* Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит методами трекового датирования и структурного анализа // Тр. ГИН РАН. 2008. Вып. 577. 319 с.
35. *Соловьев А.В., Шапиро М.Н., Гарвер Дж. И., Ландер А.В.* Формирование Восточно-Камчатской аккреционной призмы по данным трекового датирования цирконов из терригенных пород // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 11. С. 1292–1302.
36. *Ступин С.И., Серова М.Я., Щербинина Е.А. и др.* Олигоценовый известковый планктон с Кроноцкого полуострова (Восточная Камчатка) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1998. № 6. С. 85–95.
37. *Цуканов Н.В.* Тектоническое развитие Приокеанической зоны Камчатки в позднем мезозое – раннем кайнозое // Труды Гин РАН. 1991. Вып. 462. 89 с.
38. *Цуканов Н.В.* Тюшевский прогиб Восточной Камчатки: строение и геодинамическая природа // Палеонтология, стратиграфия и палеогеография мезозоя и кайнозоя бореальных районов: Материалы науч. Сессии. Т. II. Кайнозой. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. С. 172–175.
39. *Цуканов Н.В., Лобковский Л.И.* Геодинамика Олюторско-Камчатской аккреционной области в позднемеловое – раннекайнозойское время // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 2. С. 16–20.
40. *Цуканов Н.В., Лучицкая М.В., Портнягин М.В. и др.* Габбро-гранодиоритовый магматинческий комплекс Кроноцкой палеодуги (Восточная Кам-

чатка): возраст, состав и тектоническое положение // Геотоектоника. 2022. № 5. С. 50–75.

41. *Цуканов Н.В., Федорчук А.В., Литвинов А.Ф.* Океанический комплекс Шипунского полуострова (Восточная Камчатка) // Докл. АН СССР. 1991. Т. 318. № 4. С. 958–962.
42. *Цуканов Н.В., Фрейтаг Р., Гедике К.* Новые данные о возрасте и времени эксгумации осадочных комплексов Кроноцкого террейна и Тюшевского прогиба (Восточная Камчатка) по данным трекового датирования апатита // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 5–11.
43. *Чехович В.Д., Сухов А.Н., Шеремет О.Г., Кононов М.В.* Кайнозойская геодинамика Беринговоморского региона // Геотектоника. 2012. № 3. С. 47–69.
44. *Шапиро М.Н.* О северо-восточном продолжении Восточно-Камчатского синклинория // Геотектоника. 1976. № 1. С. 125–129.
45. *Шапиро М.Н.* Тектоническое развитие восточного обрамления Камчатки. М.: Наука, 1976. 122 с.
46. *Шапиро М.Н.* Надвиг Гречишкина на побережье Камчатского залива // Геотектоника. 1980. № 3. С. 85–102.
47. *Alexeiev D.V., Gaedicke Ch., Tsukanov N.V. et al.* Collision of the Kronotskiy arc at the NE Eurasia margin and structural evolution of the Kamchatka – Aleutian junction // International Journal Earth Science (Geol. Rundsch.). 2006. V. 95. P. 977–993.
48. *Gaedicke C., Baranov B., Seliverstov N. et al.* Structure of an active arc – continent collision area: the Aleutian-Kamchatka junction // Tectonophysics. 2000. V. 325. № 1. P. 63–85.
49. *Lewerenz S., Holl H., Tsukanov N.V. et al.* P-T analisys of low grade metamorphic accretionary complexes in Eastern Kamchatka Russia // Proceedings of the EUG 10 conference. Cambridge Publ, 1999. 4. Nl:107.
50. *Marsaglia K.M., Mann P., Hyatt R.J., Olson H.C.* Evaluating the influence of aseismic ridge subduction and accretion on detrital modes off ore arc sandstone: an example from the Kronotsky peninsula in the Kamchatka forearc // Lithos. 1999. V. 46. P. 17–42.
51. *Freitag R., Gaedicke C., Baranov B.V., Tsukanov N.V.* Collisional processes at the junction of the Aleutian–Kamchatka arcs: new evidence from fission track analysis and field observations // Terra Nova. 2001. № 13. P. 433–442.
52. *Nokleberg W.J., Parfenov L.M., Monger J.W.H. et al.* Summary Circum-North Pacific tectono-stratigraphic terrane map; Geological Server of Canada, Open File 3428, scale 1:10000000, 1997.

SEA TYUSHEVSKA PALEOBASIN (EASTERN KAMCHATKA): COMPOSITION AND DEVELOPMENT FEATURES

N. V. Tsukanov*

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

**e-mail: kambear2011@yandex.ru*

The work examines the features of the structure and composition of the strata of the Tyushevsky basin of Eastern Kamchatka, which was formed on the site of the Vetlovsky basin of marginal marine nature. The beginning of the formation of this structure is probably late Eocene–Oligocene. A scheme for the evolution of this basin is proposed. In the modern structure, the sediments of the Tyushevsky basin overlap the material complexes and structures of various terranes and participate in the accretionary structure of the region. Sedimentary formations are predominantly facies-variable coarse coastal-marine and/or deltaic sediments, which change up the section to deeper-water flysch formations. Oil-bearing manifestations are associated with these complexes.

Keywords: North-West Pacific, Eastern Kamchatka accretionary region, marginal sea basins, sedimentary complexes, terrigenous rocks, sedimentation, geodynamics

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 706–712

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.463.621.391

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УЧАСТКОВ ГАЗОВОЙ РАЗГРУЗКИ МОРСКОГО ДНА

© 2024 г. В. И. Каевицер, В. М. Смирнов, И. В. Смольянинов*

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, г. Фрязино Московской обл., Россия

** E-mail: ilia159@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.07.2023 г.
После доработки 27.08.2023 г.
Принята к публикации 28.12.2023 г.

Приведены и проанализированы экспериментальные результаты геолого-геоморфологических наблюдений в некоторых морских районах с активной газовой разгрузкой из донных отложений. Работы были выполнены с использованием инструментального комплекса геофизической гидролокационной аппаратуры, который включал акустический профилограф и батиметрический гидролокатор бокового обзора, использующий интерферометрический метод измерения глубин в полосе обзора. Полученные результаты подтверждают возможность применения комплекса для классификации морфологии морского дна и контроля процессов газовой разгрузки. Также эти данные дистанционного картирования дна могут быть использованы для интерпретации результатов спутникового дистанционного зондирования.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, газовая разгрузка, акустический профилограф, интерферометрический гидролокатор бокового обзора, покмарки, подводные вулканы

DOI: 10.31857/S0030157424040132, **EDN:** PQXVZT

ВВЕДЕНИЕ

Среди первоочередных мер по обеспечению национальных интересов Российской Федерации в Арктике и развитию арктической зоны РФ должны быть рассмотрены вопросы по созданию системы дистанционного мониторинга Арктической зоны, в первую очередь, методами и средствами космических активных и пассивных радиолокационных комплексов, дополненных средствами наблюдений и измерений наземного базирования.

Развитие на основе этих данных геоинформационных технологий обеспечит решение важных научных и прикладных задач: экологической безопасности в Арктике, классификации подстилающих покровов, выявления локальных и масштабных изменений, динамики естественных подстилающих покровов (ледовые покровы, береговая линия, грунты вечной мерзлоты) и инженерной инфраструктуры вследствие активной хозяйственной деятельности, обеспечения навигации во льдах, контроля экономической деятельности в прибрежных водах и др.

Для получения оперативной информации о состоянии подстилающей поверхности и явлениях, происходящих в атмосфере, широкими возможностями обладают спутниковые средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). При этом проблема интерпретации полученной информации и пригодность ее для практического использования отрабатывается с применением прямых измерений необходимых вычисляемых параметров в подспутниковых экспериментах [3, 8].

В последние годы большое внимание уделяется экологическим проблемам, связанным с выделением метана и других газов в атмосферу, при этом методы ДЗЗ позволяют оперативно обнаруживать в атмосфере места появления газовых сипов над участками акваторий морей. В работе [2] приведены данные о связи газовых сипов с источниками газовой разгрузки из водной среда и поверхности дна. Отмечено, что источниками газовой разгрузки могут быть подводные грязевые вулканы, газовые поля, с которыми связывают распространение покмарков. Экспериментальные данные об источниках газовой разгрузки, глубины и характерных размеров могут быть по-

лучены с помощью гидролокационных систем площадного картирования поверхности дна и донных отложений.

Гидролокационные технологии, позволяющие детектировать звукорассеивающие объекты при сканировании значительных объемов водной толщи в непрерывном режиме, обладают большим потенциалом для картирования очагов газовой разгрузки и получения количественных характеристик струйных газовых выделений [1, 5, 6].

В связи с возрастающими требованиями к контролю и обеспечению безопасности прокладки подводных трубопроводов, кабелей связи и других подводных сооружений в последние годы большое внимание уделяется разработке и внедрению в практику новых методов и средств диагностики морского дна. В ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН разработан и использовался в ряде инженерных обследований морских акваторий многоканальный цифровой гидролокационный комплекс, включающий интерферометрические гидролокаторы бокового обзора (ИГБО), промерный высокочастотный эхолот и низкочастотный профилограф с единым управляющим контроллером и программой регистрации, обеспечивающими синхронную регистрацию как сигнальных, так и навигационных данных. Комплекс отличается небольшими габаритами и весом и легко устанавливается на различные исследовательские суда. При проведении инженерных обследований с его использованием и обработки экспериментальных данных были определены участки дна с характерными признаками возможной газовой разгрузки [7].

Учитывая, что нефтяные и газовые сипы сохраняются на поверхности моря только в течение нескольких часов, достаточно быстро подвергаясь процессам диффузии, поглощения и рассеяния, их дальнейшее исследование целесообразно проводить в режиме мониторинга с использованием комплекса дистанционных и наземных методов [2]. Поэтому данные ДЗЗ в совокупности с наземными (подводными) измерениями позволят изучить особенности пространственно-батиметрического распределения газовых сипов и их приуроченность к разведанным углеводородным месторождениям, оценить потоки метана от отдельных струй и получить осредненные потоки газовой разгрузки участков морского дна.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА УЧАСТКЕ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Рассмотрим некоторые результаты гидролокационных исследований, проведенных с помощью ИГБО диапазона 70 кГц и эхолота профилографа диапазона 6 кГц. Район Мотовского и Кольского залива Баренцева моря, где проводилось гидролокационное обследование, показан на рис. 1. Средняя глубина 250 м. Цифрами 1 и 2 отмечены рассматриваемые далее участки обследованного

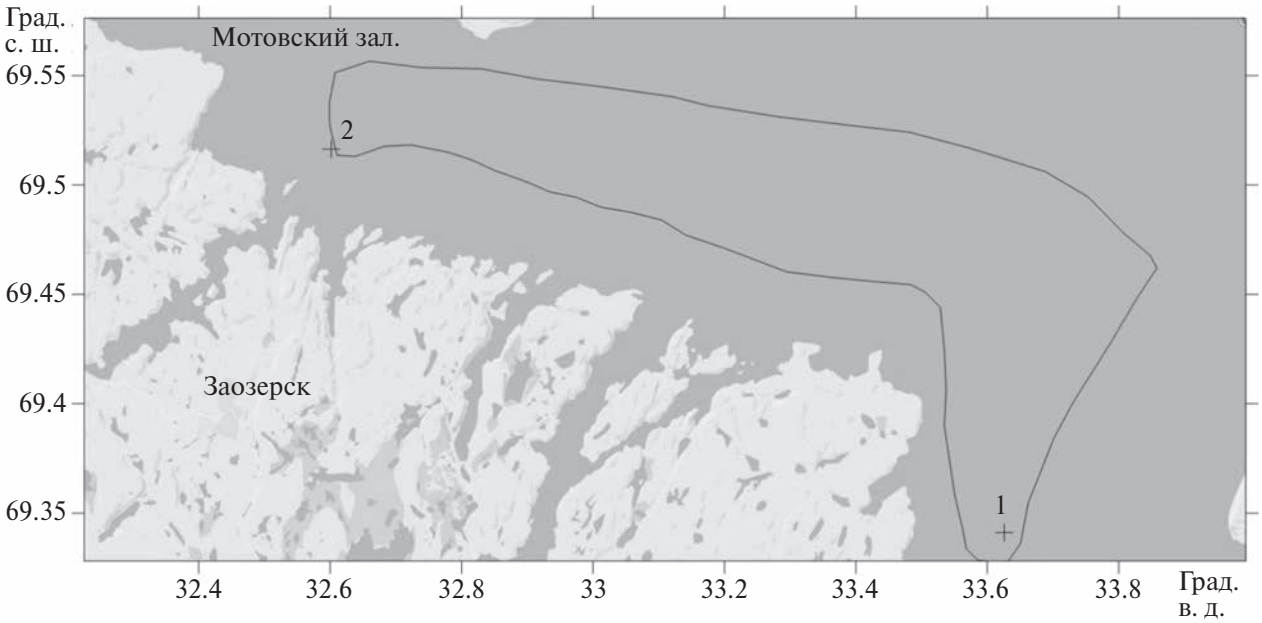

Рис. 1. Участок арктического шельфа, при гидролокационном зондировании которого экспериментально обнаружены объекты, связанные с разгрузкой газа (покмарки).

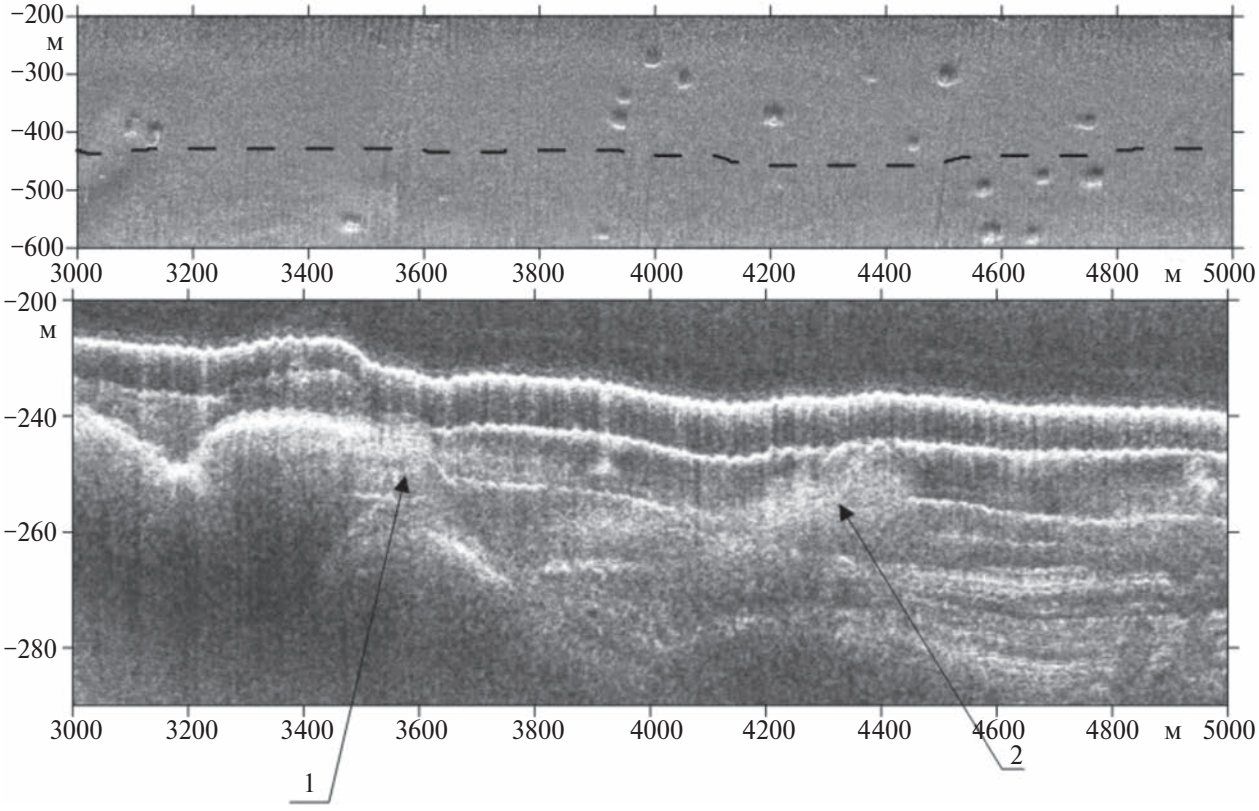

Рис. 2. Пример синхронного представления гидролокационного обследования участка 2.

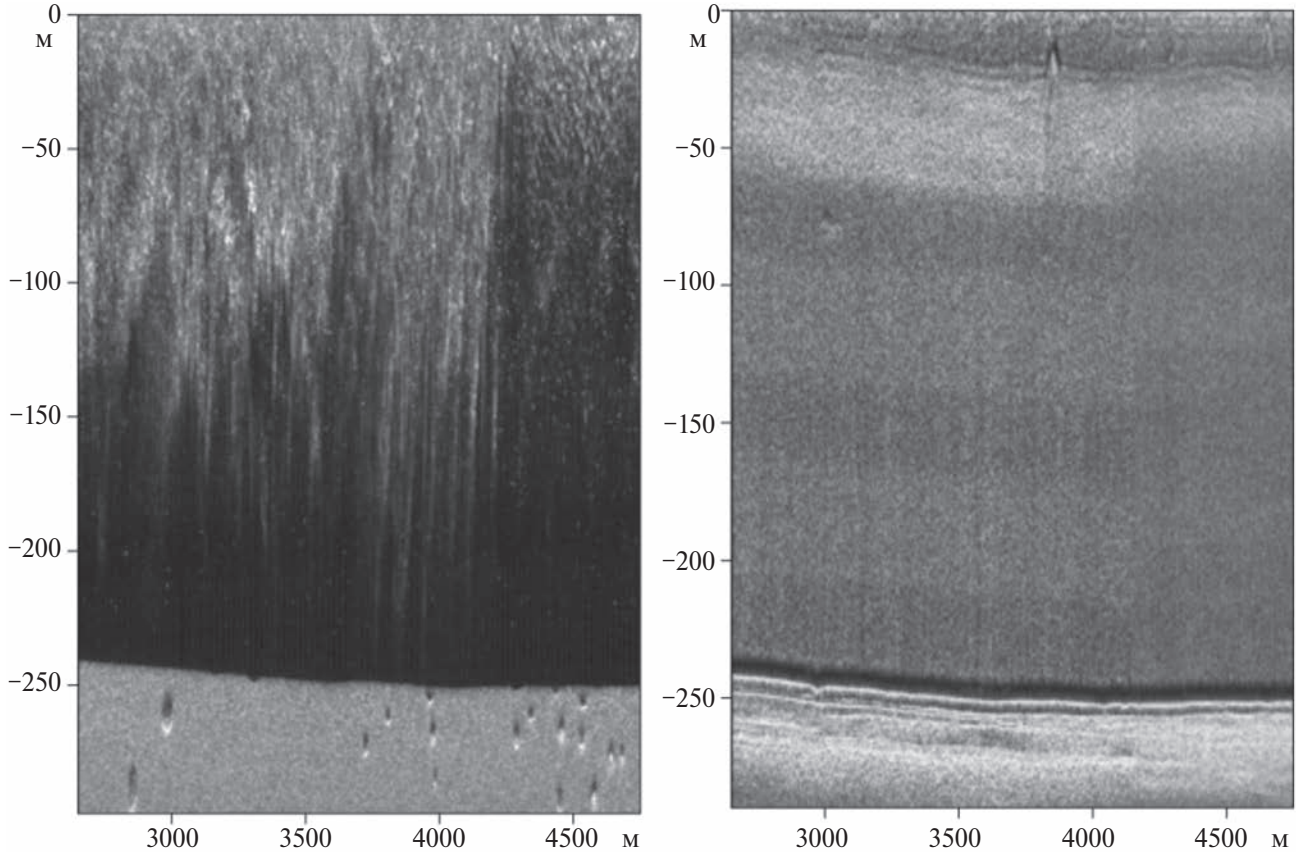

Рис. 3. Пример синхронного представления гидролокационной, батиметрической и геофизической съемки участка 1.

района, с характерными признаками разгрузки газа (покмарки). Измерения на участках 1 и 2 проводились с разницей в 4 года. При этом характерные признаки газовой разгрузки имеют долговременную стабильность. Черная линия ограничивает район гидролокационного обследования, где были обнаружены покмарки.

На рис. 2 приведены результаты промера на участке 2. В верхней части рисунка приведено гидролокационное изображение поверхности дна, на котором хорошо видны объекты типа покмарок – по акустическим теням это углубления в грунте, как правило, приуроченные к местам подводной разгрузки газообразных углеводородов. В нижней части рисунка приведено изображение разреза верхней 50-метровой толщи донных отложений, полученное с помощью акустического профилографа вдоль штриховой линии, отмеченной на гидролокационном изображении донной поверхности. Верхняя линия является границей воды и грунта и отражает изменение глубины вдоль разреза от 225 до 285 м. Донные отложения в данной области слоистые, представлены глинистым илом. При этом структура слоев частично экранируется газовыми скоплениями, отмеченными стрелками 1, 2. Особенно это заметно в области 2.

Приведенные результаты отражают возможности комплекса при проведении картирования дна и донных отложений. Структура водной толщи при этом частично или полностью отрезается. Однако при архивировании она сохраняется и может быть дополнительно исследована. Проанализируем результаты обработки архивных материалов для области 1 на рис. 1. На рис. 3 показаны результаты исследований водной тощи ГБО на частоте 70 кГц и профилографа на частоте 6 кГц. Обработка проводилась программой профилирования, что позволяет сопоставить результаты для водной толщи в одном вертикальном масштабе. При этом профиль донных отложений сохраняет масштаб, а поверхность дна имеет геометрические искажения и приведена для иллюстрации наличия в этом районе покмарок. На рис. 3 хорошо видны следы газовой разгрузки, причем в диапазоне 6 кГц они видны в виде слоев (рисунок правая часть), а в диапазоне 70 кГц видна структура газовых факелов (рисунок левая часть).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА УЧАСТКЕ С ПРОЯВЛЕНИЯМИ ПОДВОДНОГО ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНИЗМА В АКВАТОРИИ ТАМАНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Как отмечено в работе [2], газовая разгрузка в морях может быть также связана с подводным грязевым вулканизмом. В работах [4, 5] приведены результаты исследований в провинции грязевого вулканизма в акватории Таманского полуострова. Пример характерного проявления грязевого вулканизма на профилограмме донных отложений приведен на рис. 4. Область, помеченную цифрой 1, можно характеризовать сильным насыщением газов, а область 2 – это грязевой вулкан, образовавшийся в результате прорыва под давлением газов с большой глубины. Отметим, что приведенные результаты получены на малых глубинах, что не позволяет объективно оценить активность газовой разгрузки в водной толще.

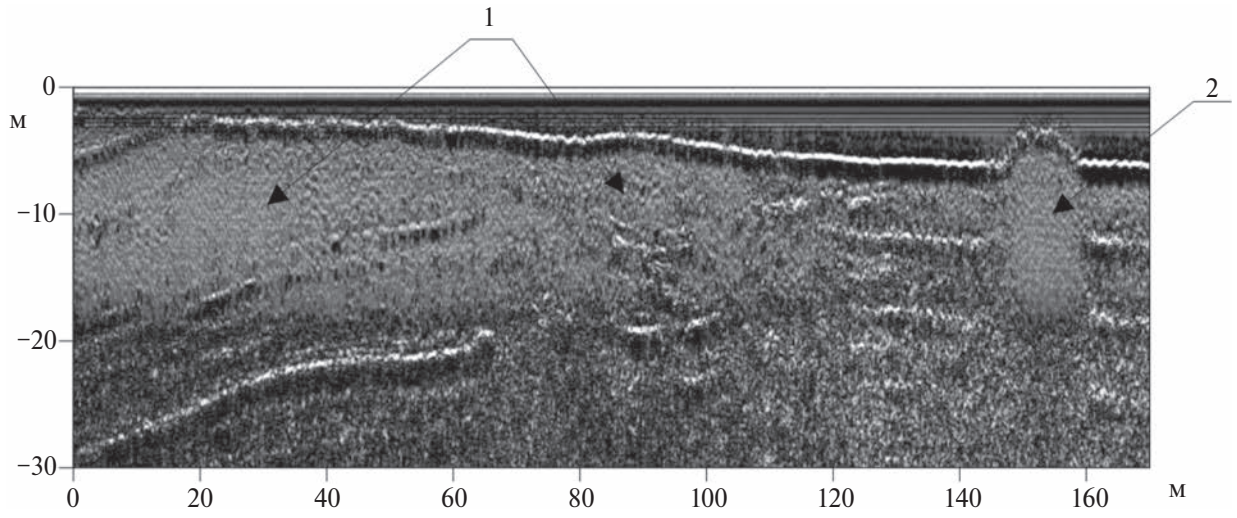

Рис. 4. Пример характерного проявления грязевого вулканизма на профилограмме донных отложений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ НА УЧАСТКЕ С ВОЗМОЖНОЙ РАЗГРУЗКОЙ ГАЗА В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ

При проведении гидрографических работ с помощью ИГБО диапазона 240 кГц и эхолота профилографа диапазона 6 кГц в районе Балтийского моря с координатами (59°16′ с. ш., 21°30′ в. д.) было обнаружено наличие сильного акустического рассеяния в водной толще. На рис. 5 приведен характерный пример таких наблюдений, который мог бы быть связан с активной газовой разгрузкой с морского дна. Глубина моря около 120 м, на верхней части рисунка приведено акустическое изображение дна, полученное с одного борта ИГБО, в средней части – профилограмма. В нижней части приведено акустическое профилирование водной толщи, полученное с помощью ИГБО. Граница водной толщи и дна видна как светлая линия на глубине 120 м. Как видно на акустическом изображении, водная толща заполнена акустическими отражателями, природа которых может быть различна. Отметим, что имеется мощный звукорассеивающий слой, экранирующий

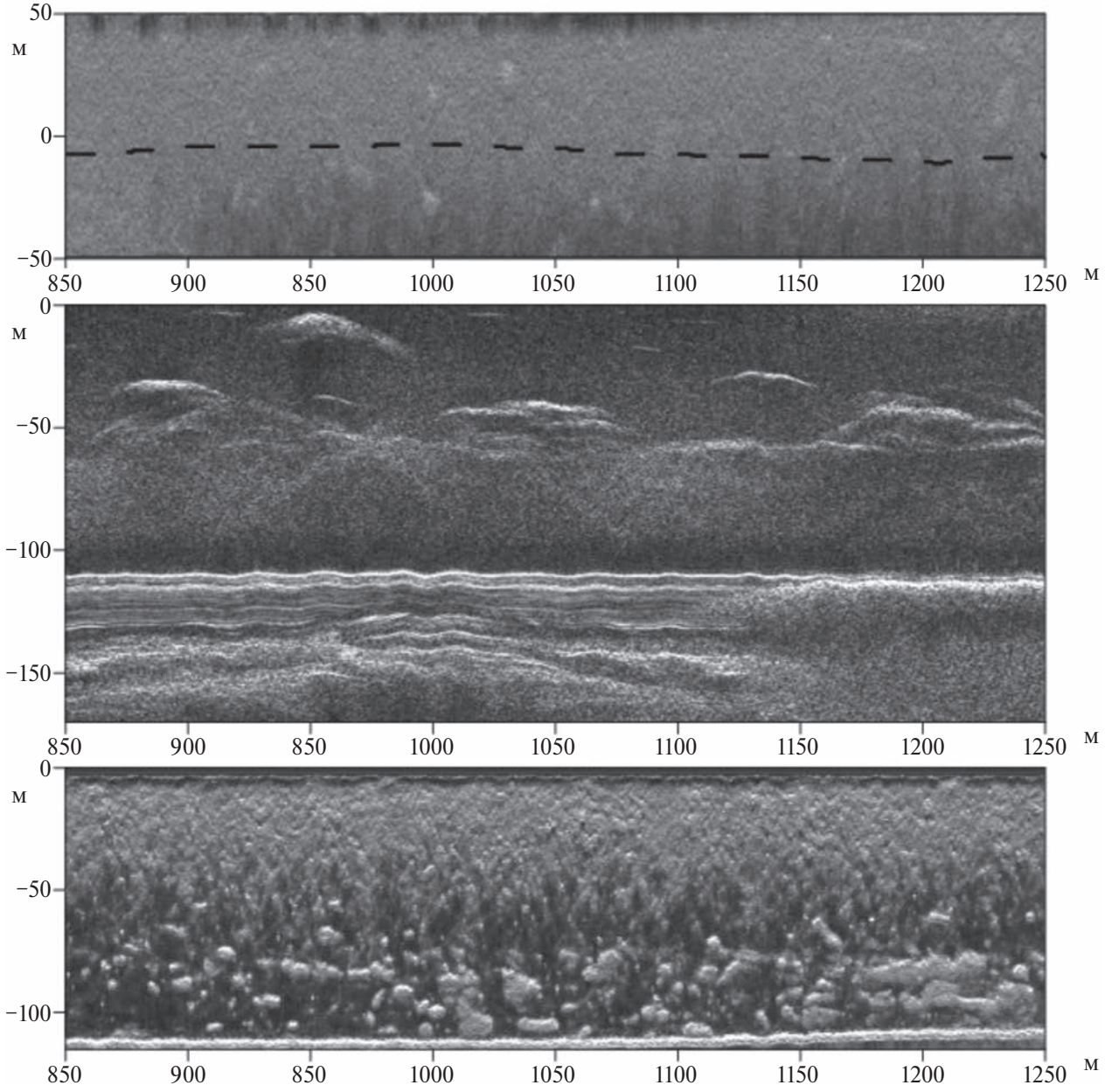

Рис. 5. Пример синхронного представления гидролокационного изображения и профилограммы в Балтийском море с координатами (59°16′ с. ш., 21°30′ в. д.).

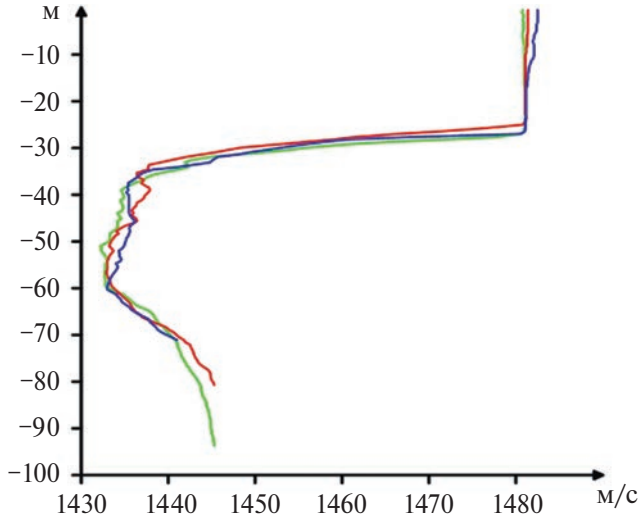

Рис. 6. Вертикальный профиль скорости звука, измеренный в районе съемки в Балтийском море.

сигналы ГБО при съемке морского дна (верхняя часть рис. 5). Сравнивая результаты профилирования воды на частотах 6 и 240 кГц, приведенных на средней и нижней частях рис. 5, можно предположить, что основной вклад в рассеяние звука вносят биологические объекты. Экспериментальные профили скорости звука в воде, полученные в районе съемки, приведены на рис. 6. Кроме того, по результатам профилирования на частоте 6 кГц на рис. 5 стрелками отмечена область насыщения донных осадков газами и разгрузки их в водную среду. С учетом расположения участка, газовая разгрузка может быть связана с наличием залежей горючих сланцев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные результаты измерений показывают, что разработанный многофункциональный инструментальный комплекс геофизической гидролокационной аппаратуры, работающий в диапазонах частот 6, 70 и 240 кГц, позволяет обнаруживать и классифицировать объекты с разгрузкой газа с морского дна. Необходимо обратить внимание, что приведенные данные о рассеянии звука в водной толще, полученные ИГБО и профилографом носят информативный характер, поскольку получены приборами с широкой характеристикой диаграммы направленности. Отмечено, что наряду с проявлениями газовой разгрузки в водной толще наблюдаются звукорассеивающие объекты и слои различной протяженности и мощности, связанные с биологическими объектами и геофизическими неоднородностями. С учетом возможностей гидролокационного комплекса на различных частотах, обеспечивающего одновременные исследования морского дна, донных отложений и структуры водной толщи, можно говорить о целесообразности и эффективности его применения для уточнения источников возникновения газовых сипов при ДЗЗ.

Источники финансирования. Работа выполнена по государственному заданию ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьев Р.А., Дмитревский Н.Н., Росляков А.Г. и др.* Использование комплексных акустических методов для мониторинга процессов эмиссии газов на шельфе Арктических морей // Океанология. 2022. Т. 62. № 1. С. 151–157.
2. *Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 30–43.
3. *Захаров А.И., Захарова Л.Н., Красногорский М.Г.* Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных уголковых отражателей // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 80–92.
4. *Каевицер В.И., Словцов И.Б., Кривцов А.П. и др.* Подводные грязевые вулканы Таманского полуострова по данным гидролокационного исследования // Вулканология и сейсмология. 2016. № 4. С. 27–33.
5. *Каевицер В.И., Римский-Корсаков Н.А., Смольянинов И.В. и др.* Возможные проявления подводных грязевых вулканов по результатам гидролокационных исследований в акватории Таманского полуострова // Океанология. 2016. Т. 56. № 5. С. 784–790.
6. *Каевицер В.И., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В.* Экспериментальные измерения следов газовой разгрузки участков морского дна в водной толще при применении многофункциональных гидролокационных комплексов // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2022. № 7. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.12
7. *Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М. и др.* Разработка и результаты испытаний гидроакустического комплекса для исследования дна шельфовой зоны Арктических морей // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. № 11. http://jre.cplire.ru/jre/nov16/1/text.pdf
8. *Родионова Н.В.* Связь радарных данных Sentinel 1 с наземными измерениями температуры почвы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 65–78.

THE USE OF SONAR SYSTEMS TO DETECT AREAS OF GAS DISCHARGE OF THE SEABED

V. I. Kaevitser, V. M. Smirnov, I. V. Smolyaninov

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, г. Фрязино Московской обл., Россия

** e-mail: ilia159@mail.ru*

Experimental results of geological and geomorphological observations in some marine areas with active gas emission from bottom sediments are presented and analyzed. The work was carried out using an instrumental complex of geophysical sonar equipment, which included a subbottom profiler and a side scan bathymetric sonar using an interferometric method for measuring depths in the field of view. The results obtained confirm the possibility of using the complex to classify the morphology of the seabed and control the processes of gas emission. The use of sonar equipment for remote mapping of the bottom under satellite observations can be used to interpret the results of satellite remote sensing of the atmosphere.

Keywords: remote sensing of the Earth, gas discharge, subbottom profiler, interferometric side-scan sonar, pokmark, underwater volcanoes

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 713–723

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.35

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ГРАВИТАЦИОННАЯ ГРУНТОВАЯ ТРУБКА: ПРЕИМУЩЕСТВА, ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ В МОРЕ

© 2024 г. А. Н. Колесник*, О. Н. Колесник, С. А. Селютин, А. А. Босин, А. С. Астахов

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

**e-mail: kolesnik_a@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 04.08.2023 г.
После доработки 27.11.2023 г.
Принята к печати 28.12.2023 г.

Рассмотрена модифицированная гравитационная грунтовая трубка (МГГТ) для более эффективного и качественного отбора кернов осадков в условиях моря и океана. Доработаны такие элементы конструкции, как кернорватель, соединительные муфты секций, груз и такелажная скоба, удалены оголовье и запорная крышка. В результате сравнительного испытания в Южно-Чукотской котловине Чукотского моря показано, что МГГТ отбирает на 30% более длинные керны, чем стандартная гравитационная грунтовая трубка (СГГТ). Судя по распределению в кернах такого редокс-чувствительного элемента, как железо, при использовании МГГТ в осадках сохраняется поверхностная окисленная пленка, то есть нарушение свойств и текстуры/структуры осадков при пробоотборе минимально.

Ключевые слова: керн осадков, гравитационная грунтовая трубка, модификация, Чукотское море

DOI: 10.31857/S0030157424040149, **EDN:** PQVMTT

ВВЕДЕНИЕ

Изучение водоемов, в том числе самых крупных и глубоких из них – морей и океанов, неразрывно связано с отбором проб донных осадков. Донные осадки современных и древних морей и океанов, исследованием которых занимается морская геология, резко преобладают над континентальными отложениями [18]. В настоящее время морская геология развивается по таким основным направлениям как [21]: 1) подводная геологическая съемка; 2) поиски и разведка подводных месторождений полезных ископаемых; 3) исследования по общей и теоретической морской геологии – стратиграфические, литологические, геохимические, металлогенические и др.; 4) палеоокеанологические и палеоклиматические исследования; 5) инженерные исследования; 6) экологические исследования. Развитие всех перечисленных направлений невозможно без создания и развития технических средств и методических разработок для отбора проб морских отложений. При этом необходимо учитывать ряд важных требований, главными их которых являются: 1) представительность отбираемых проб; 2) ненарушенность структуры и стратификации отбираемых проб; 3) надежность и удобство в эксплуатации и простота конструкции средства пробоотбора; 4) экономическая эффективность процесса пробоотбора [21].

Для получения длинномерных проб донных осадков (керны) используют грунтовые трубки разных типов [8, 16, 21, 22, 24–27, 30, 33]. Самыми распространенными являются гравитационные грунтовые трубки, которые внедряются в донный осадок под действием собственного веса (кинетическая энергия свободного падения).

Серьезный недостаток всех грунтовых трубок состоит в разрушении поверхностного слоя осадков при внедрении трубки в грунт и вымывании осадка при подъеме на борт судна с переводом трубки из вертикального положения в горизонтальное. Обычно этот недостаток пытаются компенсировать за счет совместного использования трубки с пробоотборниками типа бокскорер и/или мультикорер. С помощью бокскорера и мультикорера получают ненарушенный поверхностный слой осадков, но заглубление в грунт происходит менее чем на метр. Последовательный спуск с борта судна нескольких пробоотборников увеличивает время выполнения станции. К тому же не получается отобрать пробы в одной точке, расстояние между точками может

составлять до одной морской мили (дрейф судна). Проблема получения кернов осадков с ненарушенной текстурой/структурой и стратификацией решена для неглубоких водоемов с помощью трубки-бура и виброкорера [7, 9, 21, 29]. Опробование в таких водоемах (озеро, эстуарий, залив, лагуна, прибрежная зона моря) обычно ведется с маломерных судов в условиях относительной гидродинамической стабильности при возможности одновременной постановки на кормовой и баковый якоря, а также бурения со льда. Для морей и океанов с более сложными условиями пробоотбора оптимальное техническое решение до сих пор не найдено.

Цель нашей работы – 1) проанализировать недостатки стандартной гравитационной грунтовой трубки (СГГТ) для отбора кернов осадков в условиях моря и океана; 2) внести в конструкцию изменения для устранения/минимизации недостатков, изготовить модифицированную гравитационную грунтовую трубку (МГГТ); 3) провести сравнительное испытание рабочих характеристик МГГТ и СГГТ в условиях экспедиции с предоставлением доказательств более эффективного и качественного пробоотбора с помощью МГГТ.

КОНСТРУКЦИЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ ГРУНТОВОЙ ТРУБКИ: СТАНДАРТНЫЙ ВАРИАНТ И МОДИФИКАЦИЯ

СГГТ представляет собой стальную трубу (ствол) со съемным цилиндром наверху (рис. 1). Цилиндр называется оголовьем, к нему через такелажную скобу прикреплен трос от лебедки. Верхняя часть ствола укомплектована грузом (грузовой модуль) для эффективного врезания СГГТ в донный осадок. Нижний конец ствола оснащен ударной головкой со специальным клапаном – кернорвателем, препятствующим выпадению керна из СГГТ под действием собственного веса после пробоотбора. В верхней части оголовья находится запорная крышка, которая предохраняет керн от выдавливания из СГГТ набегающим потоком воды при подъеме. Ствол может быть цельным, однако чаще состоит из секций, соединенных муфтами. Внутри ствола находится пластиковый керновмещающий вкладыш. Длина цельного ствола не превышает 3 м, секционного – 25 м, однако обычно в морской геологии применяют СГГТ длиной 6–8 м и диаметром 50–127 мм [8]. Секционные СГГТ обладают большими габаритами и массой и используются только на судах, оборудованных гидравлической П-рамой и лебедкой (желательно также наличие палубного крана, слипа и решетки над слипом).

При выполнении спуско-подъемных работ СГГТ подвешивается на тросе к П-раме за такелажную скобу. С помощью П-рамы пробоотборник выводится за борт судна. СГГТ на тросе, длина которого контролируется лебедкой, падает до морского дна и внедряется в донный осадок, затем СГГТ вместе с отобранным керном выдергивается из осадка и поднимается на судно лебедкой. После подъема СГГТ укладывается горизонтально, с нее снимается ударная головка и извлекается вкладыш с керном.

В конструкции СГГТ имеются недостатки, устранение которых позволит выполнять пробоотбор более эффективно и качественно (рисунки 1, 2) [10].

Кернорватель. СГГТ оснащена лепестковым кернорвателем, обычно из латуни или другого относительно мягкого сплава (рис. 1, поз. 7а), что обусловливает упругость и низкую прочность данного элемента конструкции. Лепестки имеют ланцетовидную форму. Они всегда находятся в сомкнутом состоянии, образуя конус. За счет этого существенно уменьшается площадь внутреннего сечения ствола. Соответственно, при движении в воде к морскому дну в районе ударной головки СГГТ создается дополнительное сопротивление, и непосредственно перед внедрением пробоотборника в осадок происходит сильное взмучивание. Из-за того, что лепестки кернорвателя упругие, в момент внедрения в осадок происходит деформация керна, он нарезается “розочкой”. Кроме того, лепестки в СГГТ достаточно часто выламываются, что ведет к частичной или полной потере керна при подъеме.

Нами предлагается стальной лепестковый кернорватель повышенной жесткости и прочности с лепестками треугольной формы (рис. 1, поз. 7б). Лепестки при движении в воде к морскому дну не смыкаются (рис. 1, поз. 7б-2; рис. 2д), и площадь внутреннего сечения ствола МГГТ не уменьшается. При таком положении лепестков поверхностный слой осадков практически не нарушается, деформируются только краевые части керна в районе контакта осадка с вкладышем.

Секции и муфты. Секции СГГТ соединяются неразъемными муфтами (рис. 1, поз. 8а) с помощью болтов, шляпки болтов в тело муфт не утоплены (рис. 1, поз. 10а). Выступающие над поверхностью детали создают дополнительное сопротивление при движении СГГТ в воде и в донном осадке, повышают вероятность срыва крепежа. Из-за того, что муфты неразъемные, их быстрый разбор и “перезарядка” ствола за время

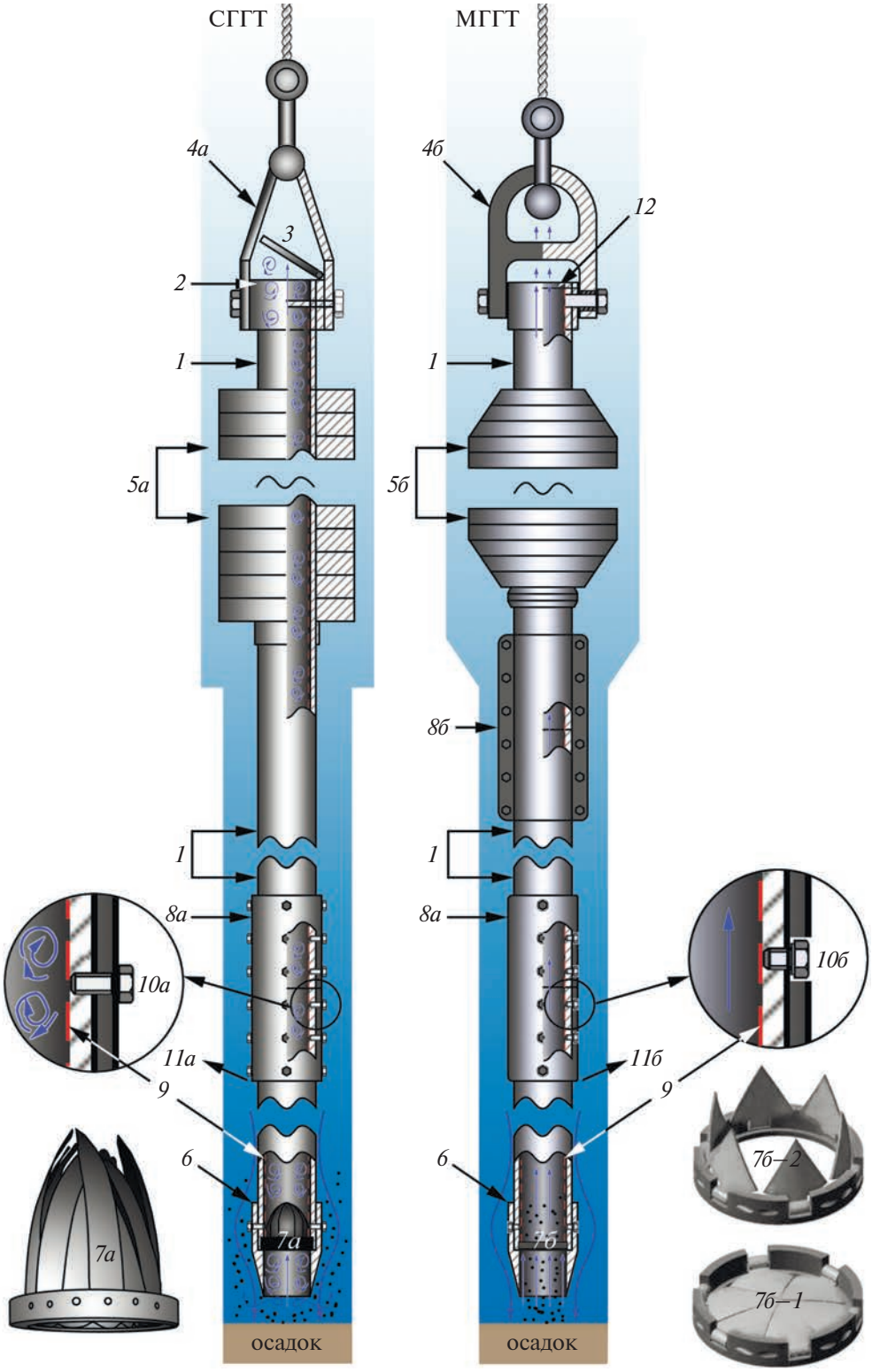

Рис. 1. Схемы стандартной и модифицированной гравитационных грунтовых трубок (СГГТ, МГГТ): общий вид и вид в разрезе. *1* – ствол; *2* – оголовье; *3* – запорная крышка; *4а* – неповоротная такелажная скоба, *4б* – поворотная такелажная скоба; *5а* – цилиндрический груз, *5б* – веретенообразный груз; *6* – ударная головка; *7а* – латунный лепестковый кернорватель с лепестками ланцетовидной формы, *7б* – стальной лепестковый кернорватель с лепестками треугольной формы в сомкнутом (*7б-1*) и разомкнутом (*7б-2*) виде; *8а* – неразъемная муфта, *8б* – разъемная муфта; *9* – керновмещающий вкладыш; *10а* – болт с неутопленной шляпкой, *10б* – болт с утопленной шляпкой; *11а* – острый торец муфты, *11б* – торец муфты, сглаженный фаской; 12 – шплинт. Синие стрелки – направление потоков воды при отборе кернов осадков [15], черные точки – частицы осадка.

Рис. 2. Общий вид модифицированной гравитационной грунтовой трубки *(а)* и ее отдельных элементов *(б–д)* в условиях морской экспедиции. Цифровые обозначения – см. подпись к рис. 1.

выполнения одной станции весьма затруднительны. В итоге при необходимости отбора на одной станции двух кернов требуется две СГГТ.

Нами предлагается использование муфт двух типов – разъемного и неразъемного. Разъемная муфта в МГГТ одна (рис. 1, поз. 8б). Она состоит из двух полуцилиндров и соединяет грузовой модуль со стволом. За счет этого одна МГГТ может отобрать на одной станции несколько кернов: разъемная муфта разбирается, ствол с первым добытым керном отсоединяется и заменяется на другой, заранее подготовленный ствол для отбора следующего керна. Неразъемные муфты в МГГТ аналогичны тем, которые используются в СГГТ (рис. 1, поз. 8а; рис. 2б). Количество неразъемных муфт зависит от количества соединяемых секций. Во всех муфтах МГГТ шляпки болтов утоплены (рис. 1, поз. 10б; рис. 2б), а торцы для создания более обтекаемого контура сглажены фасками (рис. 1, поз. 11б).

Груз. В качестве груза в СГГТ используются цилиндрические стальные диски, количество и масса которых зависит от поставленной задачи и плотности грунта (рис. 1, поз. 5а).

Нами предлагается использование стальных дисков, которые в сумме образуют не цилиндрическое, а более обтекаемое веретенообразное тело (рис. 1, поз. 5б; рис. 2в, г). Кроме выгоды с точки зрения гидроаэродинамики, веретенообразная форма груза способствует безопасному выполнению спуско-подъемных работ за счет минимизации риска зацепов МГГТ за решетку над слипом.

Запорная крышка. Несмотря на то, что запорная крышка дает существенный отрицательный эффект – дополнительное сопротивление воды при спуске, она обязательный элемент СГГТ (рис. 1, поз. 3). Необходимость ее использования объясняется тем, что во время подъема латунный кернорватель СГГТ (рис. 1, поз. 7а) не гарантирует удержания керна внутри пробоотборника: керн может выпасть под действием собственного веса и набегающего потока воды.

Нами предлагается убрать оголовье с запорной крышкой из конструкции МГГТ. В МГГТ, в отличие от СГГТ, используется стальной кернорватель (рис. 1, поз. 7б; рис. 2д), который выдерживает все возникающие в процессе пробоотбора нагрузки. Благодаря тому, что лепестки стального кернорвателя при спуске МГГТ не смыкаются (рис. 1, поз. 7б-2), а запорная крышка отсутствует, сечение ствола остается полностью открытым. Это значительно уменьшает сопротивление воды. В итоге при прочих равных условиях МГГТ внедряется в донные осадки глубже и взмучивает их меньше, чем СГГТ. Поднятие МГГТ на борт судна происходит так, чтобы верхняя открытая часть ствола, лишенная запорной крышки, была выше уровня палубы и через эту верхнюю открытую часть внутрь до касания поверхности осадка можно было погрузить утяжеленную шарообразную камеру из полутвердой резины. Перед тем как погрузить камеру, из ствола вынимается шплинт (рис. 1, поз. 12; рис. 2г), фиксирующий пластиковый вкладыш с керном. Камера снабжена патрубком и соединена с насосом-компрессором для нагнетания внутрь камеры воздуха и отделения таким образом поверхности осадка от наддонного слоя воды.

Такелажная скоба. В СГГТ такелажная скоба (рис. 1, поз. 4а) закреплена на оголовье неподвижно с помощью сварки. При спуско-подъемных работах с переводом СГГТ из горизонтального положения в вертикальное и наоборот в районе оголовья возникает разрушительная нагрузка на излом, такелажная скоба часто гнется либо ломается.

Нами предлагается такелажная скоба (рис. 1, поз. 4б; рис. 2г), которая может вращаться вокруг ствола МГГТ и крепится непосредственно к стволу с помощью болтов (оголовье в МГГТ отсутствует). Ствол в районе поворотной такелажной скобы усилен стальным кольцом.

С учетом всех изменений, предложенных нами в конструкции СГГТ, изготовлена МГГТ.

РАЙОН ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ РАБОТ. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Районом работ выбрана Южно-Чукотская котловина (Центрально-Чукотская впадина) Чукотского моря (рис. 3). Это крупная слабоотрицательная форма рельефа, почти равнина, в пределах которой происходит накопление терригенного и биогенного (аморфный кремнезем) материала и формируется стратиграфически наиболее полная голоценовая толща мощностью не менее 5 м [20]. Глубина моря здесь варьирует от 45 до 55 м. Голоценовые осадки монотонные – серого цвета (восстановленные), существенно алевритовые, мягкие, плотностью до 1.6 г/см^3, без каких-либо следов перерыва в накоплении [13, 20]. Ледовое выпахивание не развито [19]. Криогенные процессы также не развиты, шельф Чукотского моря относится к внеледниковому типу [4]. Таким образом, район работ характеризуется однотипностью природных условий и свойств донных осадков, а также хорошей геологической опробованностью и детальной изученностью некоторых осадочных разрезов [3, 6, 28, 31].

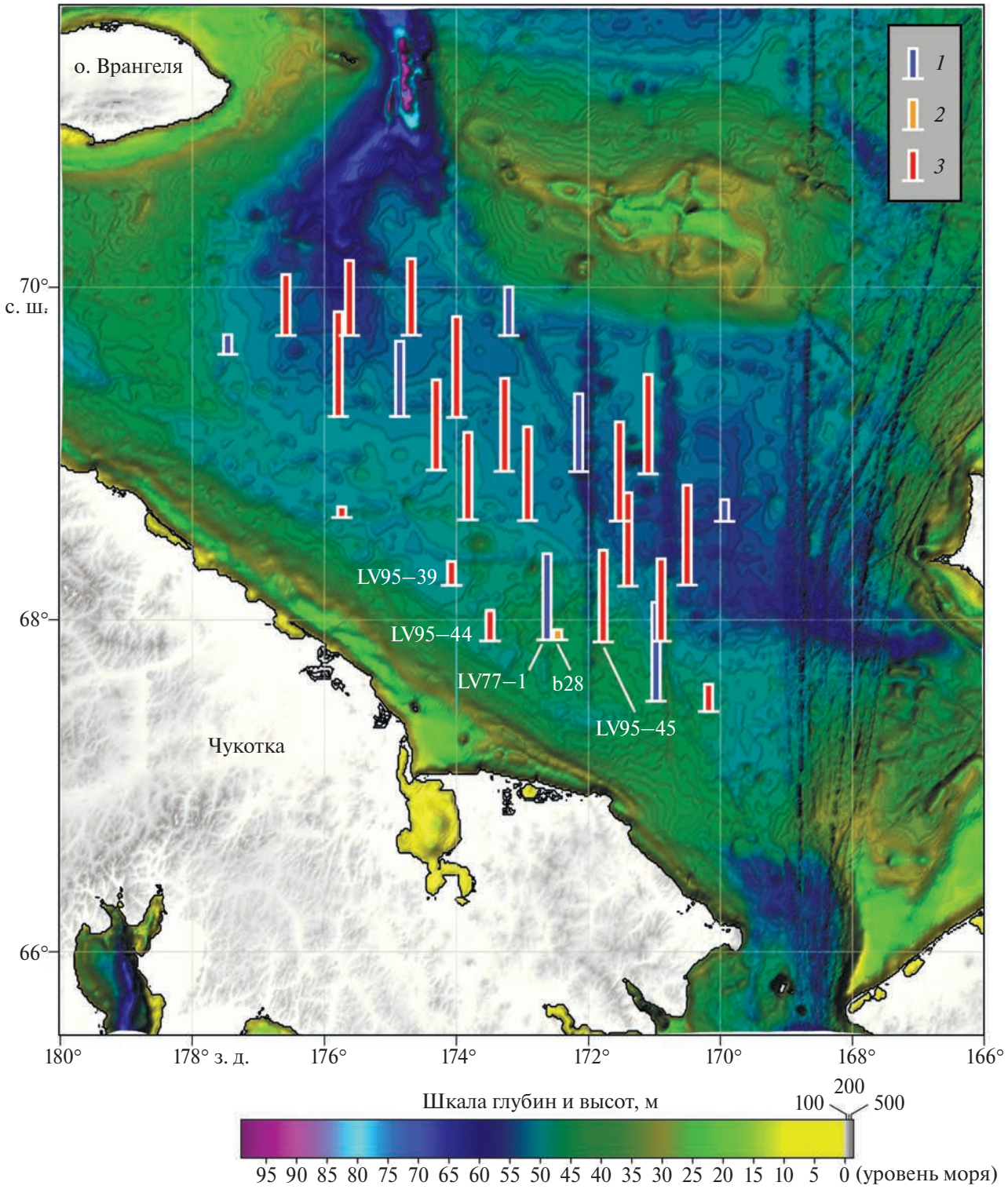

Рис. 3. Карта Чукотского моря со станциями пробоотбора и относительной длиной проб, включая демонстрационные пробы с номерами: *1* – керны осадков, отобранные стандартной гравитационной грунтовой трубкой (НИС “Академик М.А. Лаврентьев”, 2016 г., 2018 г.); *2* – проба осадка, отобранная бокскорером (НИС “Профессор Хромов”, 2012 г.); *3* – керны осадков, отобранные модифицированной гравитационной грунтовой трубкой (НИС “Академик М.А. Лаврентьев”, 2021 г.). Картографическая основа составлена по данным ГЕБКО 2022.

Испытание МГГТ проведено в Южно-Чукотской котловине в сентябре 2021 г. на НИС “Академик М.А. Лаврентьев” (95-й рейс). Пробоотбор с помощью СГГТ выполнен ранее в этом же районе на этом же судне и в это же время года (77-й рейс, 2016 г., 83-й рейс, 2018 г.). Оба пробоотборника имели длину 6 м, диаметр ствола 160 мм и толщину стенки ствола 6 мм. Снаряженная масса пробоотборников составляла 650–700 кг, скорость их спуска на дно – 2 м/с. НИС “Академик М.А. Лаврентьев”, наряду с такими судами, как НИС “Профессор Мультановский” или, например, НИС “Профессор Хромов”, входит в группу наиболее распространенных среднекрупных судов научно-исследовательского флота России [17]. Водоизмещение таких судов составляет 2–3 тыс. т, длина палубы – 65–82 м. Они оборудованы всем необходимым для пробоотбора грунтовыми трубками в условиях моря и океана: гидравлической П-рамой (обычно находится в кормовой части судна), лебедкой, слипом и решеткой над слипом, а также довольно часто – палубным краном. Таким образом, для МГГТ и СГГТ обеспечены очень близкие условия пробоотбора, при которых действительно существенными представляются только конструктивные различия пробоотборников.

Все керны осадков, добытые с помощью СГГТ и МГГТ, проходили обязательное колориметрическое (цвет, текстура) и рентгенофлуоресцентное (химический состав) экспресс-сканирование по отработанным методикам. Колориметрическое сканирование выполнялось с помощью оригинальной колориметрической фотоустановки на базе цифрового фотоаппарата Canon EOS6d Mark с объективом Canon EF 50mm f/1.2L USM (Япония) [1, 11, 12]. Перед каждой съемкой производилась калибровка фотоустановки с использованием калибровочного набора X-Rite (США) [32]. Фотоустановка работала со сверхвысокой скоростью (2 мин. на метр керна) и сверхвысоким разрешением (0.067 мм). Это особенно важно в условиях быстрых и необратимых изменений цвета и текстуры осадков, которые происходят в процессе подъема на борт судна и дальнейшего хранения. Запись информации о цвете производилась в координатах цветовой модели CIE L*a*b*. Рентгенофлуоресцентное сканирование выполнялось с помощью оригинального устройства на базе портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра Olympus Vanta (США) с заводской калибровой [1, 5, 23]. Работа проводилась с шагом 3 мм методом геохимического анализа ГеоХим.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Длина кернов осадков, отобранных в Южно-Чукотской котловине с помощью МГГТ, составила в среднем 326 см, СГГТ – 250 см (рис. 3). Соответственно, глубина внедрения МГГТ в грунт (эффективность пробоотбора) оказалась выше на 30%. Длина отбора образца с помощью грунтовой трубки зависит от очень многих факторов [21] и, прежде всего, от скорости спуска трубки на дно, ее массы и гидроаэродинамической формы. Во время испытательных работ СГГТ и МГГТ имели очень близкие массы и одинаковые скорости спуска на дно. Таким образом, эффективность пробоотбора почти полностью контролировалась гидроаэродинамической формой трубок. У МГГТ форма была обтекаемее. Основные доработки в данном случае касались кернорвателя (замена латунного лепесткового кернорвателя повышенной упругости и пониженной прочности с длинными ланцетовидными лепестками на стальной лепестковый кернорватель повышенной жесткости и прочности с короткими треугольными лепестками) и запорной крышки (удаление запорной крышки из конструкции трубки). Кроме того, цилиндрический груз был заменен на веретенообразный, выступающие элементы трубки утоплены, а углы сглажены. Целью всех этих доработок было обеспечение постоянно открытого внутреннего сечения ствола трубки и создание максимально обтекаемой формы пробоотборника для минимизации сопротивления воды при падении пробоотборника на морское дно и сопротивления осадка при внедрении пробоотборника в грунт.

Качество пробоотбора донных осадков оценивается по степени сохранности естественной структуры и стратификации отбираемых проб [21]. В большинстве случаев надежным доказательством того, что проба грунта отобрана качественно, является сохранность верхнего окисленного слоя. Несмотря на то, что на основной площади Чукотского моря мощность верхнего окисленного слоя не превышает нескольких миллиметров (окисленная пленка) [14] и визуально окисленный слой не различим, его можно фиксировать, если он не нарушен при пробоотборе, по комбинации значений некоторых колориметрических (CIE a*, CIE b*) и геохимических (Fe, Mn) характеристик. В нашем случае наиболее выразительным оказалось распределение железа. В отличие от оксидов марганца, оксиды железа менее растворимы в воде и менее подвижны, поэтому они раньше, уже в пределах шельфа, переходят в осадок, тогда как марганец

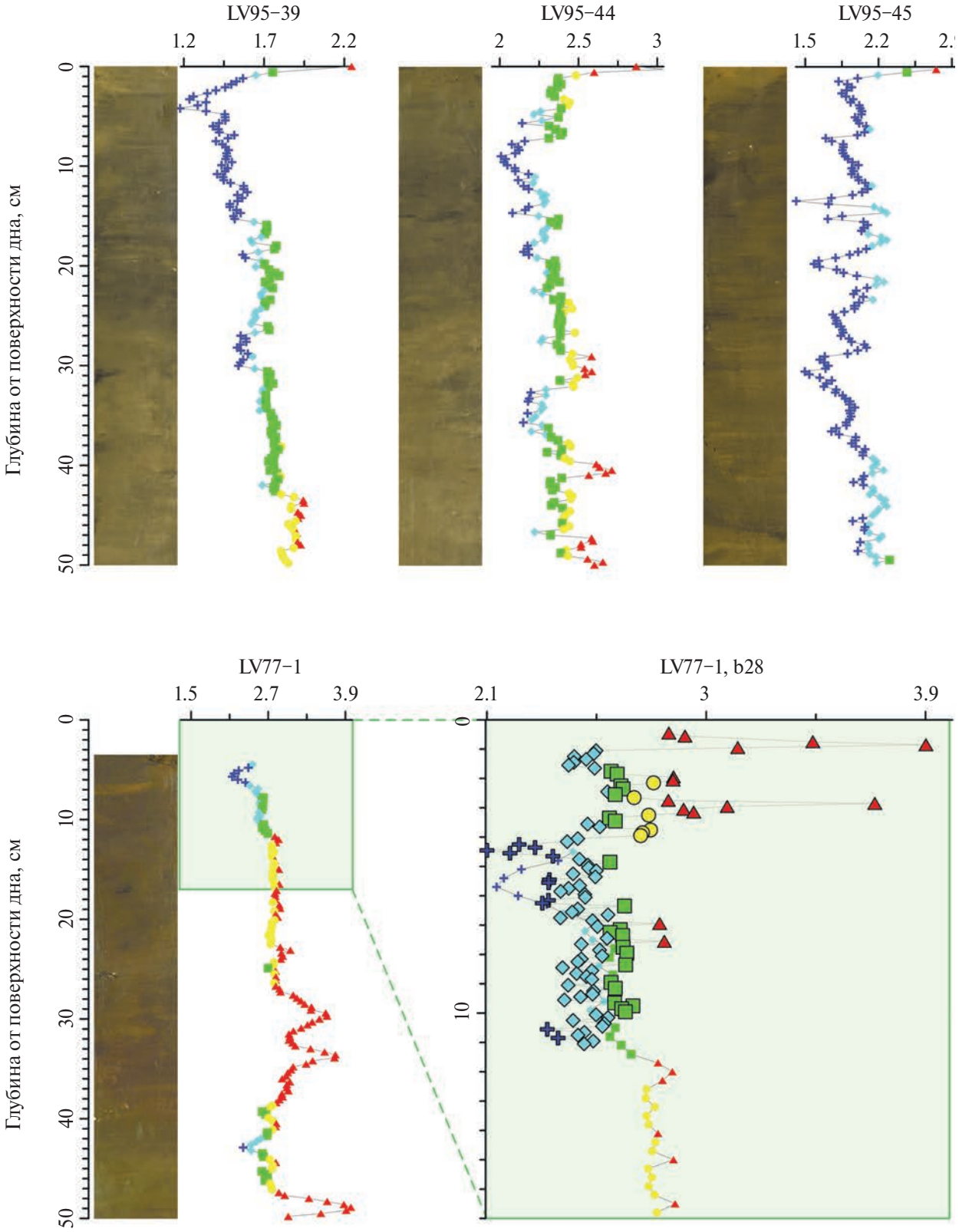

Рис. 4. Фотографические изображения и кривые распределения железа (%) для верхней части близкорасположенных осадочных разрезов, вскрытых в Южно-Чукотской котловине Чукотского моря модифицированной гравитационной грунтовой трубкой (керны LV95–39, LV95–44, LV95–45), стандартной гравитационной грунтовой трубкой (керн LV77–1) и бокскорером (проба b28). Цветными значками показаны повышенные (красные), слабо повышенные (желтые), нейтральные (зеленые), слабо пониженные (голубые) и пониженные (синие) содержания железа относительно среднего значения по разрезу (мелкие значки – трубка, крупные – бокскорер).

обычно выносится за пределы шельфа в океан [2]. Сравнение кривых распределения железа в верхних частях осадочных разрезов, полученных различными пробоотборниками – МГГТ, СГГТ и бокскорером, – показало, что близкое распределение с повышенным содержанием железа в поверхностном слое осадка (окисленный слой) демонстрируют разрезы, полученные с помощью МГГТ и бокскорера (рис. 4). При этом бокскорер относится к пробоотборникам, которые не нарушают поверхностный слой осадков, и поэтому может считаться в некоторой степени эталоном качества пробоотбора. Очевидно, что пробоотбор с помощью МГГТ с сохранением естественной структуры и стратификации осадков стал возможен в первую очередь благодаря изменениям в конструкции кернорвателя и удалению запорной крышки. Эти доработки, направленные на уменьшение сопротивления воды и донных осадков, позволили существенно уменьшить взмучивание осадка в момент внедрения в него МГГТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отбор максимально длинных кернов донных осадков при минимальном нарушении их свойств и текстуры/структуры – одна из актуальных проблем в области оборудования для морских геологических исследований. Наиболее распространенным устройством для отбора кернов осадков в условиях моря и океана является стандартная гравитационная грунтовая трубка (СГГТ).

В результате анализа недостатков СГГТ и внесения в конструкцию ряда изменений создан модифицированный вариант гравитационной грунтовой трубки (МГГТ). Изменения касались кернорвателя, муфт, соединяющих секции трубки, а также груза и такелажной скобы. Такие элементы СГГТ, как оголовье и запорная крышка, были удалены.

Основные рабочие характеристики МГГТ апробированы в Южно-Чукотской котловине Чукотского моря. Результаты сопоставлены с полученными ранее в этом же районе при сходных условиях с помощью других пробоотборников – СГГТ и бокскорера. В итоге установлено, что МГГТ позволяет отбирать на 30% более длинные керны, чем СГГТ. О хорошей сохранности поверхностного слоя осадков при отборе МГГТ, включая тонкую окисленную пленку, говорит, прежде всего, схожее распределение редокс-чувствительного элемента железа в осадочных разрезах, вскрытых МГГТ и бокскорером (бокскорер относится к пробоотборникам, которые не нарушают поверхностный слой осадков).

Источники финансирования. Изготовление модифицированной гравитационной грунтовой трубки и подготовка данной публикации выполнены за счет средств Российского научного фонда (грант 22-17-00118, https://rscf.ru/project/22-17-00118/). Апробация трубки проведена в морской экспедиции, поддержанной Минобрнауки России (тема 124022100084-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аlаторцев А.В., Колесник А.Н., Ши С. и др.* Литологические и геохимические признаки ледовой экзарации в голоценовых осадках Восточно-Сибирского моря // Геология и геофизика. 2023. № 9. С. 1249–1257.
2. *Белов Н.А., Огородников В.И.* Особенности современного осадкообразования и некоторые вопросы геохимии донных осадков шельфа Чукотского моря // Вестник Ленинградского ун-та. Серия геология, география. 1976. Т. 24. Вып. 4. С. 52–61.
3. *Вологина Е.Г., Штурм М., Кулагина Н.В., Аксентов К.И.* Вещественный состав позднеголоценовых отложений южной части Чукотского моря // Океанология. 2023. Т. 63. № 1. С. 84–94.
4. *Гаврилов А.В.* Типизация арктических шельфов по условиям формирования мерзлых толщ // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 3. С. 69–79.
5. *Гуленко Т.А., Волков В.Г., Лопатников Е.А.* Сканирующее устройство экспресс анализа кернов. Патент RU197194 U1, 10.04.2020. 8 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU197194U1_20200410.pdf. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 19.11.2023.
6. *Гусев Е.А., Аникина Н.Ю., Деревянко Л.Г. и др.* Развитие природной среды южной части Чукотского моря в голоцене // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 505–517.
7. *Гусев Е.А., Шнейдер Г.В., Рекант П.В., Каракозов А.А.* Результаты неглубокого бурения на Таймыре и на шельфе восточно-арктических морей России // Горный журнал. 2021. № 12. С. 4–9.
8. Информационная система по морскому оборудованию. Технические средства для проведения геологических исследований. Sea-Technics.ru 2017–2019. URL: sea-technics.ru/tekhnicheskie-sredstva-dlya-provedeniya-geologicheskikh-issledovanii. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 19.11.2023.
9. *Каракозов А.А., Калиниченко О.И., Зыбинский П.В. и др.* Результаты опытной эксплуатации установки УМБ-130М при проведении геологосъемочных работ в Чукотском море // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-геологічна. 2007. Вип. 6 (125). С. 53–57.
10. *Колесник А.Н.* Гравитационный пробоотборник и способ его использования. Патент RU2795338 C1, 02.05.2023. Бюл. № 13. 16 с.

URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/86/18/c4/1860feb9ce38d5/RU2795338C1.pdf. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 19.11.2023.

11. *Колесник А.Н., Босин А.А.* Мобильное устройство для определения цветовых характеристик горных пород. Патент RU2741268 C1, 22.01.2021. 14 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2741268C1_20210122.pdf. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 19.11.2023.
12. *Колесник А.Н., Колесник О.Н., Янченко Е.А. и др.* Новое колориметрическое устройство для целей морской геологии и литостратиграфии // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 3 (45). С. 41–55.
13. *Кошелева В.А., Яшин Д.В.* Донные осадки Арктических морей России. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1999. 286 с.
14. *Куликов Н.Н., Лапина Н.Н., Семенов Ю.П. и др.* Стратификация и скорости накопления донных отложений Арктических морей СССР // Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. С. 34–41.
15. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. 5-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2001. 736 с.
16. *Лобанов В.А.* Справочник по технике освоения шельфа. Л.: Судостроение, 1983. 288 с.
17. Морские исследования России. Научно-исследовательский флот России. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ 2002–2023. URL: https://ocean.extech.ru/ships/. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 19.11.2023.
18. Морские отложения. Большая советская энциклопедия. URL: http://niv.ru/doc/encyclopedia/bse/articles/7982/morskie-otlozheniya.htm. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 14.01.2024.
19. *Огородов С.А.* Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 173 с.
20. *Павлидис Ю.А.* Обстановка осадконакопления в Чукотском море и фациально-седиментационные зоны его шельфа // Проблемы геоморфологии, литологии и литодинамики шельфа. М.: Наука, 1982. С. 47–76.
21. *Савельев В.И.* Техника морских геологических исследований. М.: Недра, 1978. 165 с.
22. *Селиверстов Н.И.* Методы исследования дна океана // Введение в геологию океанов и морей. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 17–44.
23. Серия Vanta – Рентгенофлуоресцентный анализатор. Руководство по эксплуатации. DMTA-10072–01RU, версия A, февраль 2016. 124 с.
24. *Смолдырев А.Е.* Методика и техника морских геологоразведочных работ. М.: Недра, 1978. 303 с.
25. *Смолов Ю.С.* Техника для отбора проб донных осадков. Опыт работ и перспективы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015. № 1. С. 80–90.
26. *Сомервилл С.Г., Пауль М.А.* Словарь по геотехнике. Пер. с англ. Л.: Недра, 1986. 240 с.
27. *Турский А.А.* Техника морских геологических исследований. Л.: ЛГИ, 1980. 105 с.
28. *Цой И.Б., Обрезкова М.С., Аксентов К.И. и др.* Позднеголоценовые изменения среды юго-западной части Чукотского моря по результатам диатомового анализа // Биология моря. 2017. Т. 43. № 4. С. 246–255.
29. *Чечко В.А., Пака В.Т., Подуфалов А.П.* Новый подход к получению стратиграфически не нарушенных колонок донных осадков в неглубоких водоемах // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 4. С. 177–184.
30. *Шелковников И.Г., Лукошков А.В.* Технические средства подводного разведочного бурения и опробования. Л.: Изд-во ЛГУ, 1979. 224 с.
31. *Astakhov A.S., Shi Suefa, Darin A.V. et al.* Reconstructing ice conditions in the southern Chukchi Sea during the last millennium based on chemical composition of sediments and diatom assemblages // Marine Geology. 2020. V. 427. 106220.
32. Color Data. X-Rite Incorporated. Copyright 2009. URL: https://xritephoto.com/documents/literature/en/ColorData-1p_EN.pdf. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 14.01.2024.
33. *Mayers J.J., Holm C.H., McAllister R.F.* (Eds.) Handbook of Ocean and Underwater Engineering. McGraw-Hill, 1969. 1100 p.

THE MODIFIED GRAVITY CORER: ADVANTAGES AND OFFSHORE TESTING

A. N. Kolesnik*, O. N. Kolesnik, S. A. Selyutin, A. A. Bosin, A. S. Astakhov

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
** e-mail: kolesnik_a@poi.dvo.ru*

The modified gravity corer (MGC) for more efficient and high-quality sediment core sampling is considered. Such construction elements as the core catcher, section muff joints, the weight, and the loop have been modified; the crown and the locking plate have been removed. As a result of the comparative test in the South Chukchi Basin of the Chukchi Sea it is shown that the MGC sampled 30% longer cores than the standard gravity corer (SGC). Judging by the distribution of such a redox sensitive element as iron in the cores, when using the MGC, a surface oxidized film remains in sediments. Thus, the disturbance of properties and textures/structures of sediments under sampling is the lowest.

Keywords: sediment core, gravity corer, modification, Chukchi Sea

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 724–727

ИНФОРМАЦИЯ

УДК 556.54

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАГУННЫХ ЭСТУАРИЕВ О. ВАЙГАЧ В ЛЕТНЮЮ МЕЖЕНЬ 2023 г.

© 2024 г. И. В. Мискевич, Д. С. Мосеев, А. С. Лохов, Е. И. Котова

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

** e-mail: szoiran@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.10.2023 г.
После доработки 29.11.2023 г.
Принята к публикации 28.12.2023 г.

Северо-Западное отделение ИО РАН провело комплексные исследования рек Красная и Варкуцьяха на о. Вайгач в летнюю межень 2023 г., направленные на изучение специфики формирования маргинальных фильтров в лагунных эстуариях арктического острова. Наибольшие концентрации взвешенных веществ в этих реках отмечались около верхней границы зоны смешения морских и речных вод. В распределении металлов в устьях рек наблюдалось два участка их максимального накопления – во фронтальной зоне, а для марганца и мышьяка – в вершине устья.

Ключевые слова: остров Вайгач, маргинальный фильтр, малые реки, микроприливные устья рек, лагунный эстуарий

DOI: 10.31857/S0030157424040158, **EDN:** PQQHMF

Для многих островов российской Арктики типично наличие развитой гидрографической сети, сформированной из малых рек и ручьев. Исследованиями геохимических и биохимических процессов в микроприливных устьях таких водотоков практически никто не занимался. Имеется ряд работ для устьев малых рек материкового побережья Баренцева и Белого морей, например [5], но все они относятся к макроприливным или мезоприливным устьям рек. При этом характер функционирования в островных микроприливных устьях рек маргинальных фильтров, определяющих обмен веществами между сушей и морем, при разрушении многолетнемерзлых грунтов на фоне наблюдаемого климатического потепления остается малоизученным [4].

В рамках решения данной проблемы сотрудники СЗО ИО РАН в июле 2023 г. провели комплексные исследования микроприливных эстуариев Красная и Варкуцьяха в юго-западной части о. Вайгач. Устьевые участки данных рек имеют лагуны, что характерно для многих рек арктических островов.

Задачей проводимых исследований было определение специфики формирования маргинальных фильтров в лагунных устьях рек арктического острова. В каждом устье реки осуществлялись:

• полусуточные наблюдения за уровнем воды, температурой воды, соленостью, кислородом (с помощью анализатора Multi *3420* фирмы *WTW*), величиной pH (с помощью pH-метра *Марк-903*) и отбор проб воды на содержание взвешенных веществ в поверхностном горизонте;

• наблюдения за температурой воды, соленостью, кислородом, величиной pH и отбор проб воды на содержание взвешенных веществ, общего фосфора и общего азота на 5 станциях в поверхностном горизонте в полную воду приливного цикла. Расстояние между станциями составляло около 1 км (*0 км* – морская граница устьевого взморья реки, *1 км* – морская граница лагуны);

• отбор проб донных отложений и водорослей для определения содержания в них алюминия и тяжелых металлов (марганца, меди, мышьяка, никеля, свинца и цинка);

• фиксация характера водной растительности на участках проведения гидролого-гидрохимических исследований.

Выделение взвеси проводилось методом мембранной ультрафильтрации под вакуумом через чистые ядерные фильтры. Для определения общего фосфора и общего азота из одной пробы воды использовался метод, предложенный Королевым и уточненный Вальдеррамом. Анализ проб донных отложений и водорослей на металлы проводился методом атомно-эмиссионного анализа согласно ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011.

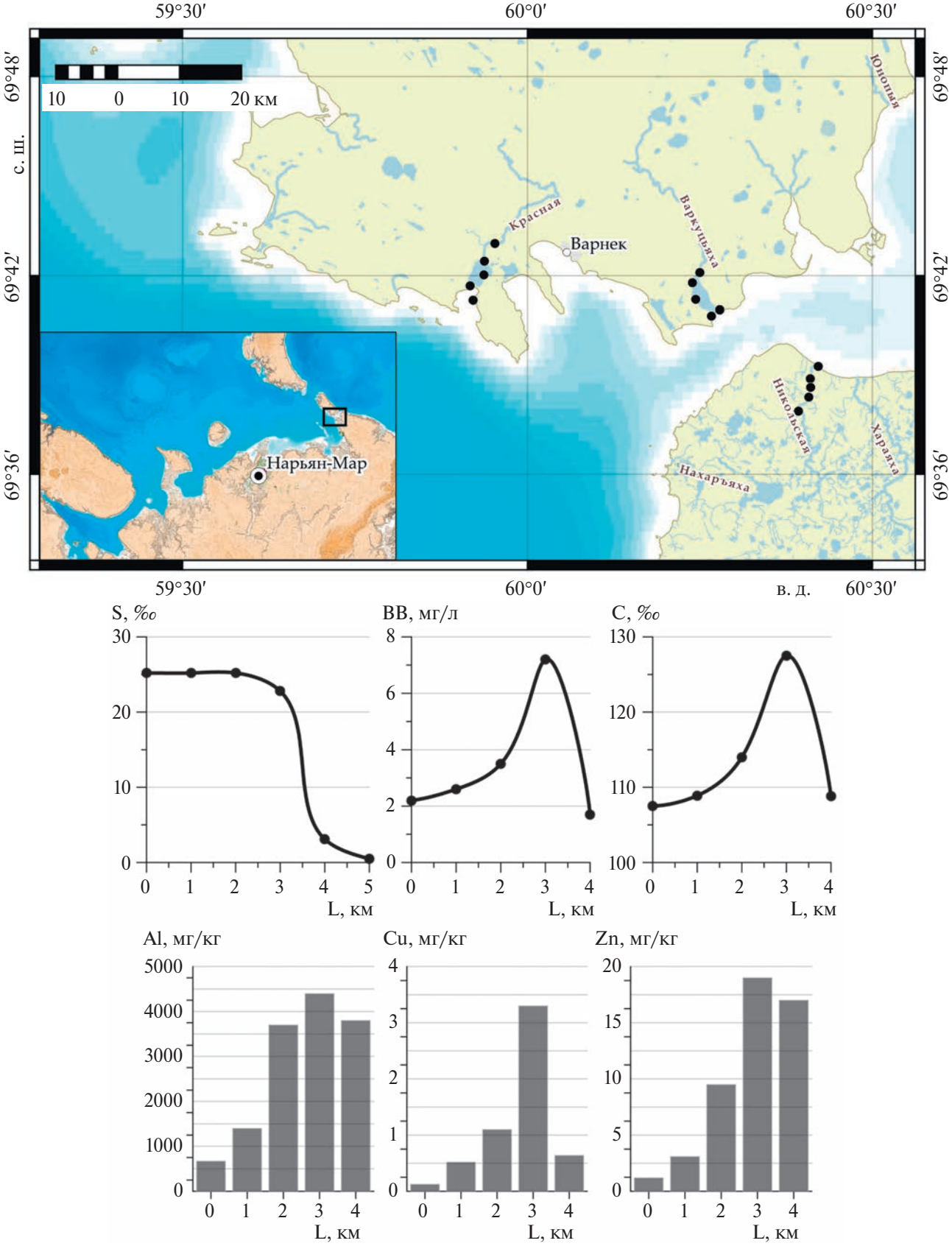

Рисунок. Схема района работ на о. Вайгач в летнюю межень 2023 г. (вверху) и распределение солености (S), взвешенных веществ (BB), кислородонасыщения (C) в воде, алюминия (Al), меди (Cu) и цинка (Zn) в донных отложениях вдоль устья р. Красной в июле 2023 г. (внизу).

Устье р. Красной относится к лагунно-эстуарному типу и состоит из открытого устьевого взморья протяженностью около 1 км, лагуны длиной около 1.6 км и шириной 0.7–1 км, воронкообразного эстуария длиной около 1 км и устьевого участка реки длиной около 0.8 км. Устье р. Варкуцьяхи относится к лагунно-дельтовому типу и включает устьевое взморье протяженностью около 1 км, лагуну длиной около 0.6 км и шириной 0.3–0.5 км, малорукавную дельту длиной около 1.5 км и устьевой участок реки длиной около 1.4 км. Устья данных рек очень мелководны, наибольшие глубины здесь обычно не превышают 0.5 м, и лишь на морских границах лагун в узких проливах они достигают 3 м.

В исследуемых лагунных эстуариях рек о. Вайгача наблюдался полусуточный тип прилива, его величина колебалась в интервале 25–33 см. Устьевые участки даже на малой воде приливного цикла заполняли морские воды с соленостью 3–25‰, что, видимо, было обусловлено пересыханием верховьев этих рек при наличии аномально жаркой погоды. Температура воды в верхних частях устьев рек достигала 18.2–24.6°C, на границе с морем – 13.2–15.1°C.

Наибольшие концентрации взвеси (мутьевые “пробки”) в рассматриваемых эстуариях отмечались около верхней границы зоны смешения морских и речных вод (рисунок). Такая граница в устье р. Красной соответствует границе лагуны с воронкообразным расширением, в устье р. Варкуцъяхи – вершине малорукавной дельты.

Седиментация взвешенного вещества получает максимальное развитие непосредственно на акватории лагун, а в море (на устьевые взморья рек в проливе Югорский Шар) взвешенные наносы практически не поступают. Одновременно наблюдалось совпадение максимумов содержания взвесей и кислородонасыщения устьевых вод (рисунок), которое было сравнительно высоким. Их появление можно связать с дополнительным поступлением в устьевые экосистемы биогенных веществ, образующихся при деструкции многолетнемерзлых грунтов, что интенсифицирует процессы фотосинтеза планктона и водных макрофитов. На морских границах лагун наблюдались разреженные заросли бурых водорослей с преобладанием *Fucus distichus*. Непосредственно в лагунах начинают явно доминировать зеленые нитчатые водоросли, в частности, *Ulva prolifera,* которые могут служить одним из индикаторов эвтрофикации водного объекта.

В исследованных устьях рек о. Вайгач в распределении металлов отмечалось наличие 2-х следующих закономерностей: 1) Максимальное накопление металлов во фронтальной зоне, где также локализуются максимумы содержания взвесей и кислородонасыщения устьевых вод (рисунок); 2) Максимальное накопление металлов в вершинах устьев рек. Это отмечалось только для марганца и мышьяка. Здесь необходимо заметить, что концентрации данных металлов (совместно со свинцом) в растворимых формах имеют наибольшие значения в снежном покрове в устье р. Печоры по отношению к другим тяжелым металлам и алюминию.

Появление подобных максимумов, очевидно, зависит от форм присутствия металлов в горных породах на водосборах рек, учитывая возможность их различной растворимости в составе разнотипных солей, гидроокислов и других соединений [1], а также от величины pH таликовых вод. При этом содержание металлов в водорослях, особенно в зеленых, было заметно выше по сравнению с донными отложениями. Следует предположить, что для марганца и мышьяка загрязнение донных отложений в пределах действия маргинальных фильтров лагунных устьев рек о. Вайгача, помимо разгрузки подземных вод и выщелачивания коренных пород, также может зависеть от уровней загрязнения атмосферных осадков.

Таким образом, можно предположить, что в лагунных эстуариях малых рек маргинальные фильтры, в которых все три ступени практически совпадают друг с другом, не выходят за пределы лагун. Это препятствует транзиту веществ, освобождаемых при таянии многолетнемерзлых пород, в прибрежные районы арктических морей. В микроприливных устьях больших рек арктической зоны России структура маргинального фильтра имеет иной характер [2, 3, 6].

Источники финансирования. Исследования устьев рек о. Вайгач были выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00225 (https://rscf.ru/project/23-27-00225/).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гордеев В.В.* Геохимия системы река–море. М.: ИП Матушкина И.И., 2012. 452 с.
2. *Гордеев В.В., Филиппов А.С., Кравчишина М.Д. и др.* Особенности геохимии речного стока в Белое море // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 225–308.
3. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.

4. *Мискевич И.В., Коробов В.Б., Мосеев Д.С.* Специфика формирования маргинальных фильтров в приливных устьях рек арктических морей // Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 141–146.
5. *Савенко А.В., Покровский О.С., Кожин М.Н.* Трансформация стока растворенных веществ в устьевых областях малых водотоков южного побережья Кольского залива // Океанология. 2011. Т. 51. № 5. С. 837–848.
6. Печорское море. Системные исследования (Гидрофизика, гидрология, оптика, биология, химия, геология, экология, социо-экон. проблемы). М.: Море, 2003. 502 с.

RESEARCH OF THE LAGOON ESTUARIES OF VAYGACH ISLAND IN A 2023 SUMMER LOW WATER PERIOD

I. V. Miskevich, D. S. Moseev, A. S. Lokhov, E. I. Kotova

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

** e-mail: szoiran@mail.ru*

The paper describes complex research of the Krasnaya and Varkutsyakha Rivers of the Vaigach Island in a 2023 summer low water period completed by the Shirshov Institute of Oceanology North-Western Branch. This research is aimed to studying mixing zones formation specifics for lagoon estuaries of arctic islands. Suspended particulate matter concentrations maximum was found near the mixing zone upper bound. The maximum metal accumulation areas were observed in the river's mouth frontal area and in its upper part for manganese and arsenic.

Keywords: Vaigach Island, river mixing zones, small rivers, micro-tidal estuary, lagoon estuary

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 728–730

ИНФОРМАЦИЯ

УДК 550.84+550.46

ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ АКВАТОРИИ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО (ЯПОНСКОЕ МОРЕ) В 83-М РЕЙСЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СУДНА “ПРОФЕССОР ГАГАРИНСКИЙ”

© 2024 г. А. В. Яцук*, М. А. Бовсун, Р. Б. Шакиров, А. В. Стороженко, В. В. Калинчук, Д. С. Максеев, И. Г. Югай, Е. В. Лифанский, П. Д. Жердев, Р. А. Григоров, Д. А. Швалов, К. И. Аксентов, А. Ю. Лазарюк, Е. И. Ярощук

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

**e-mail: yatsuk@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 07.06.23 г.
После доработки 08.08.23 г.
Принята к публикации 28.12.23 г.

В работе приведены краткие результаты газогеохимических и гидрометеорологических исследований внешней акватории залива Петра Великого (Японское море), полученные в результате морского экспедиционного исследования на НИС “Профессор Гагаринский” (рейс № 83) в октябре – ноябре 2022 г. В результате экспедиции впервые выполнены площадные атмохимические измерения климатически активных газов (CH_4, CO_2, пары H_2O) и Hg(0) в приводном слое атмосферы внешней акватории залива Петра Великого, детализированы газогеохимические поля в донных отложениях и водной толще, уточнено современное положение газовых факелов в пределах внешнего шельфа залива Посьет, проведены долговременные станции морского суточного мониторинга.

Ключевые слова: газогеохимия, климатически активные газы, метан, газопроявления, залив Петра Великого, Японское море

DOI: 10.31857/S0030157424040167, **EDN:** PQODAW

Экспедиционное морское исследование на НИС “Профессор Гагаринский” рейс № 83 проведено в период с 20 октября по 30 ноября 2022 г. Экспедиция организована ТОИ ДВО РАН в рамках программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 гг.). Основной целью экспедиции являлось исследование газогеохимического и гидрометеорологического состояния внешней акватории залива Петра Великого (Японское море) с учетом влияния климатических факторов и абиотических факторов окружающей среды.

Основными задачами экспедиции являлись: исследование современного состояния газогеохимических и литогеохимических полей в донных отложениях и водной толще; организация суточных морских станций атмохимического, гидрологического и метеорологического мониторинга в условиях мелководного шельфа; проведение площадных попутных атмохимических, газогеохимических, океанологических и метеорологических измерений для изучения процессов газообмена в системе вода–атмосфера в районе внешней акватории залива Петра Великого (ЗПВ).

Общее выполнение научных исследований разбилось на три этапа с работами на двух основных полигонах (рисунок). В составе экспедиции приняли участие 7 научных сотрудников – среди них 4 молодых специалиста в возрасте до 35 лет (один студент и два аспиранта).

Комплекс исследовательских методов включал работы на океанографических станциях, попутные измерения по ходу движения судна и суточный мониторинг климатически активных газов на якорных стоянках (10 суточных станций). На комплексных океанографических станциях выполнялось зондирование водной толщи CTD-зондом SBE-19 (114 станций), отбор воды батометрами, отбор донных осадков пробоотборником “Box Core” (95 станций). Попутные исследования (2730 миль непрерывного профилирования) на переходах включали измерения температуры и солености с помощью проточного термосолинографа SBE45, дискретный отбор

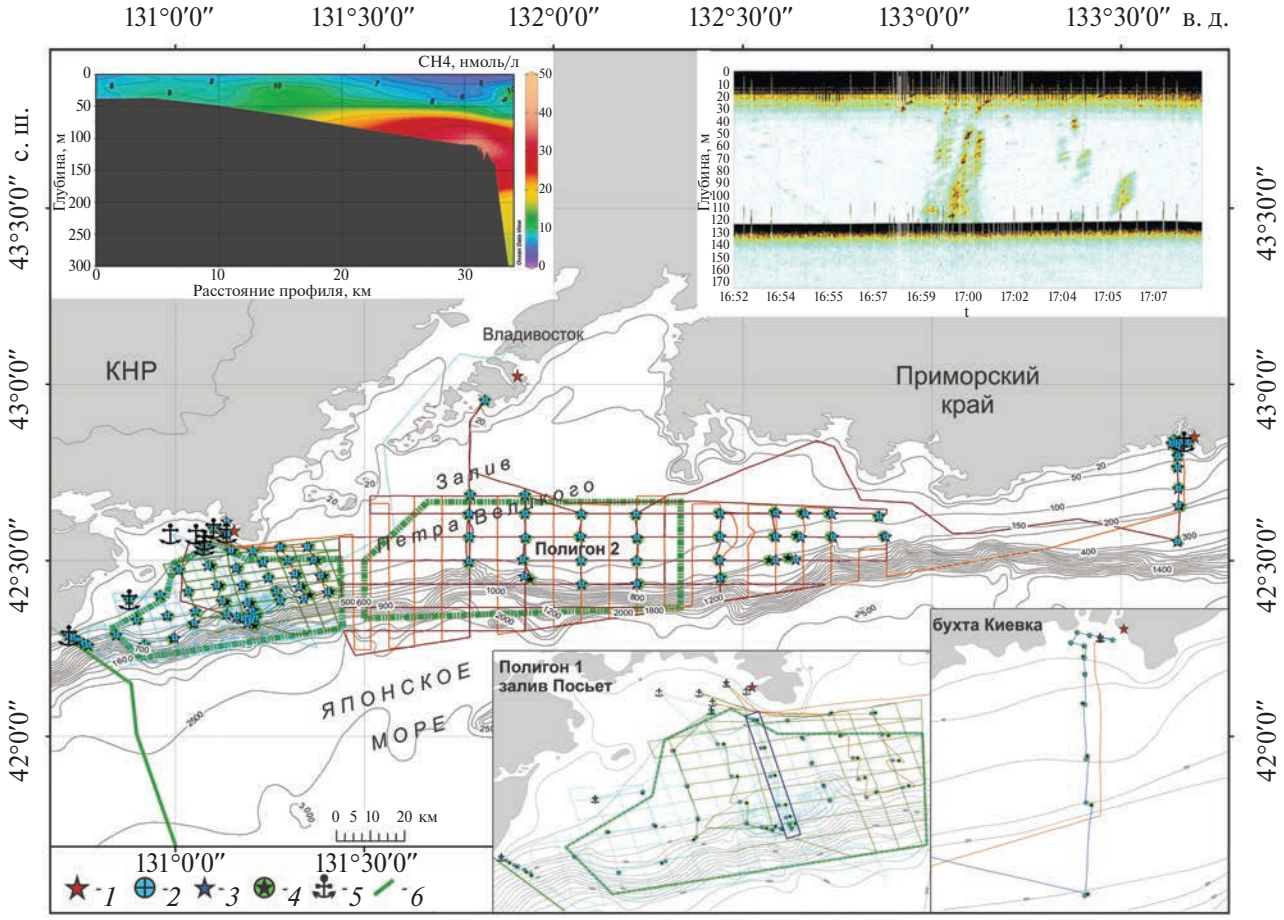

Рисунок. Карта-схема маршрута исследования и расположения основных полигонов работ в рейсе № 83 НИС "Профессор Гагаринский", 20 октября – 30 ноября 2022 г. На врезках примеры индикации газовых факелов (справа) и распределения метана (в нмоль/л) по профилю в водной толще залива Посьет (слева). 1 – площадки проекта Дальневосточный карбоновый полигон Приморского края; 2 – станции зондирования водной толщи; 3 – отбор проб водной толщи; 4 – отбор проб донных отложений; 5 – станции суточного газогеохимического мониторинга; 6 – граница территориальных вод РФ.

и набортный газохроматографический анализ проб поверхностной морской воды; атмохимические (Hg(0), CH_4, CO_2, пары H_2O) и метеорологические измерения в приводном слое атмосферы.

В результате экспедиции впервые выполнены синхронные и взаимодополняющие себя атмохимические измерения атомарной ртути Hg(0) и климатически активных газов (CH_4, CO_2, пары H_2O) в пределах всей внешней акватории ЗПВ, позволяющие проводить моделирование сезонного атмосферного переноса, верифицировать возможные источники в системе суша–море и море–атмосфера. Полученные результаты легли в основу зарегистрированных баз данных [3, 4] и дополнили исследования по глубоководным акваториям Японского моря [5].

В районе Гамовского каньона (внешний шельф залива Посьет) выполнены детальные гидроакустические исследования подводных газопроявлений (рисунок), в результате которых уточнено их современное положение. Всего было обнаружено около 113 газопроявлений различной формы и интенсивности, на глубинах 100–150 м. Наличие подобной зоны активной флюидоразгрузки в непосредственной близости от г. Владивостока (в пределах 30 км) является прекрасным морским полигоном для отработки методов фиксации газовыделений и валидации газогеохимических данных, получаемых на различных уровнях исследований (от ДЗЗ до измерений in situ). В заливе Посьете обнаружено аномальное газогеохимическое поле метана (концентрации метана свыше 40 нмоль/л, при фоновых концентрациях 4–6 нмоль/л) в придонных водных горизонтах сипового поля (рисунок). Данный район нуждается в постановке дальнейших детальных комплексных исследований, в том числе и в глубоководной части, перспективной для поиска морских газогидратов и других форм минеральных ресурсов [1, 2].

Выполненное в экспедиции газогеохимическое опробование водной толщи и донных осадков ЗПВ существенно расширило современную газогеохимическую изученность района исследований. Были получены важные сведения о базовых литолого-геохимических характеристиках донных осадков (физико-химические свойства, органонасыщенность, микробиологические параметры и др.) в пределах двух локаций Дальневосточного карбонового полигона Приморского края (МЭС “м. Шульца” и бухта Киевка), которые будут использованы в дальнейших исследованиях углеродного цикла морских экосистем данных площадок.

Благодарности. Научный состав благодарит капитана О.Н. Угольникова и экипаж за активную помощь в работе. Отдельная благодарность руководству ТОИ ДВО РАН, НацОНИФ и Минобрнауки РФ за содействие в решении вопросов организации экспедиции.

Финансирование работы. Экспедиционные работы проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзаданий и НИР Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН: ФНТП “Разработка системы климатического мониторинга Дальневосточных морей” в рамках мероприятия “Климатический и экологический мониторинг ключевых районов Мирового океана, прибрежных зон и морей России, включая характеристики циркуляции, теплосодержания и потоков парниковых газов и энергии на границе океан–атмосфера” (рук. от ТОИ ДВО РАН академик РАН Долгих Г.И.); Важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” (рук. от ТОИ ДВО РАН академик РАН Долгих Г.И.); № FWMM-2024-0029; Дальневосточного Федерального университета № FZNS-2023-0019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Буров Б.А., Обжиров А.И., Гресов А.И. и др.* К вопросу о формировании аномалий концентраций метана и электромагнитного поля в юго-западной части залива Петра Великого (Японское море) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 9. С. 1469–1480.
2. *Валитов М.Г., Шакиров Р.Б., Яцук А.В. и др.* Комплексная геолого-геофизическая экспедиция на научно-исследовательском судне “Академик Опарин” в Татарском проливе Японского моря (рейс № 54, 2017 г.) // Океанология. 2019. Т. 59. № 2. С. 311–314.
3. *Яцук А.В., Бовсун М.А.* Климатически активные газы в приводном слое атмосферы залива Петра Великого (Японское море), измеренные за период с 21 октября по 30 ноября 2022 г.: RU2023620699 Россия. ТОИ ДВО РАН. 2023.
4. *Яцук А.В., Бовсун М.А.* Метеорологические и климатические параметры приводного слоя атмосферы залива Петра Великого (Японское море), измеренные за период с 21 октября по 30 ноября 2022 г.: RU2023620723 Россия. ТОИ ДВО РАН. 2023.
5. *Kalinchuk V., Yatsuk A., Marchesini L.B. et al.* The first simultaneous and continuous underway measurements of atmospheric gaseous elemental mercury, carbon dioxide and methane in the marine boundary layer: Results of cruise study in the Sea of Japan in May 2018 // Atmospheric Pollution Research. 2022. V. 13. № 7. 101458.

АНГЛИЙСКИЙ???????

ОКЕАНОЛОГИЯ, 2024, том 64, № 4, с. 731–734

ИНФОРМАЦИЯ

УДК 550.47, 552.14, 550.42, 579, 574.5

93-й РЕЙС НИС “АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ”: ГЕОСИСТЕМЫ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА ЕВРАЗИИ В СЕЗОН АКТИВНОГО РАЗВИТИЯ ОСЕННЕ-ЗИМНЕЙ КОНВЕКЦИИ И ПОЛЯРНОЙ НОЧИ

© 2024 г. М. Д. Кравчишина[1, *], А. А. Клювиткин[1], А. Н. Новигатский[1], А. Г. Матуль[1], В. В. Иванов[2], Д. А. Пестунов[3], Ю. А. Штабкин[4], Б. В. Баранов[1], С. В. Галкин[1], А. К. Амбросимов[1], Н. В. Козина[1], О. Н. Лукьянова[1], И. А. Немировская[1]

[1] Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[3] Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
[4] Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
** e-mail: kravchishina@ocean.ru*

Поступила в редакцию 07.03.2024 г.
После доработки 07.03.2024 г.
Принята к публикации 16.04.2024 г.

В экспедиции “Европейская Арктика–2023: геологическая летопись изменений среды и климата” выполнены многодисциплинарные исследования системы “донные осадки–водная толща–приводный слой атмосферы” в Баренцевом, Печорском морях и Байдарацкой губе Карского моря в сезон полярной ночи и активного развития осенне-зимней термической конвекции. По ряду направлений получены принципиально новые данные.

Ключевые слова: седиментация, биогеохимия, климат, метан, палеоокеанология, Арктика

DOI: 10.31857/S0030157424040173, **EDN:** PQIXCI

Экспедиция “Европейская Арктика–2023: геологическая летопись изменений среды и климата” проводилась в рамках программы Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по исследованию осадкообразования, колебаний климата и региональных особенностей эмиссии метана в области контакта холодной арктической и теплой атлантической воды [6]. Европейская Арктика, включающая Баренцево море и пролив Фрама, – ключевой регион глобального океанического конвейера, процессы в котором определяли климат и условия окружающей среды во всем “арктическом средиземноморье” и северном полушарии в плейстоцене и, особенно выразительно, в последние 16–17 тыс. лет на переходе от последнего оледенения плейстоцена к современному межледниковью голоцена. Сокращение ледяного покрова и таяние ледников на островах Арктики в XXI в. можно рассматривать в качестве современного периода регионального перигляциала [6] – аналога неоднократно проявляющихся периодов потепления в голоцене [2].

Исследования выполнялись в период полярной ночи с 8 ноября по 7 декабря 2023 г. в Баренцевом, Печорском морях и Байдарацкой губе Карского моря (рис. 1) как на ходу судна по всему маршруту протяженностью ~4000 морских миль, так и на 124-х комплексных океанологических станциях. Усилиями многодисциплинарного коллектива реализованы совокупные исследования донных осадков, водной толщи и приводного слоя атмосферы, в том числе, для решения задач по созданию системы мониторинга климатических изменений и климатически активных веществ согласно Распоряжению Правительства РФ от 29.10.2022 № 3240-р [1, 5]. Приведем лишь отдельные важные и принципиально новые результаты.

Впервые с применением камерного метода выполнено 273 измерения потоков газов на границе вода–атмосфера на базе газоанализатора $CO_2/CH_4/H_2O$ Picarro G4301 [10] на 79 станциях. Зафиксирована эмиссия метана в атмосферу благодаря молекулярной диффузии интенсивностью

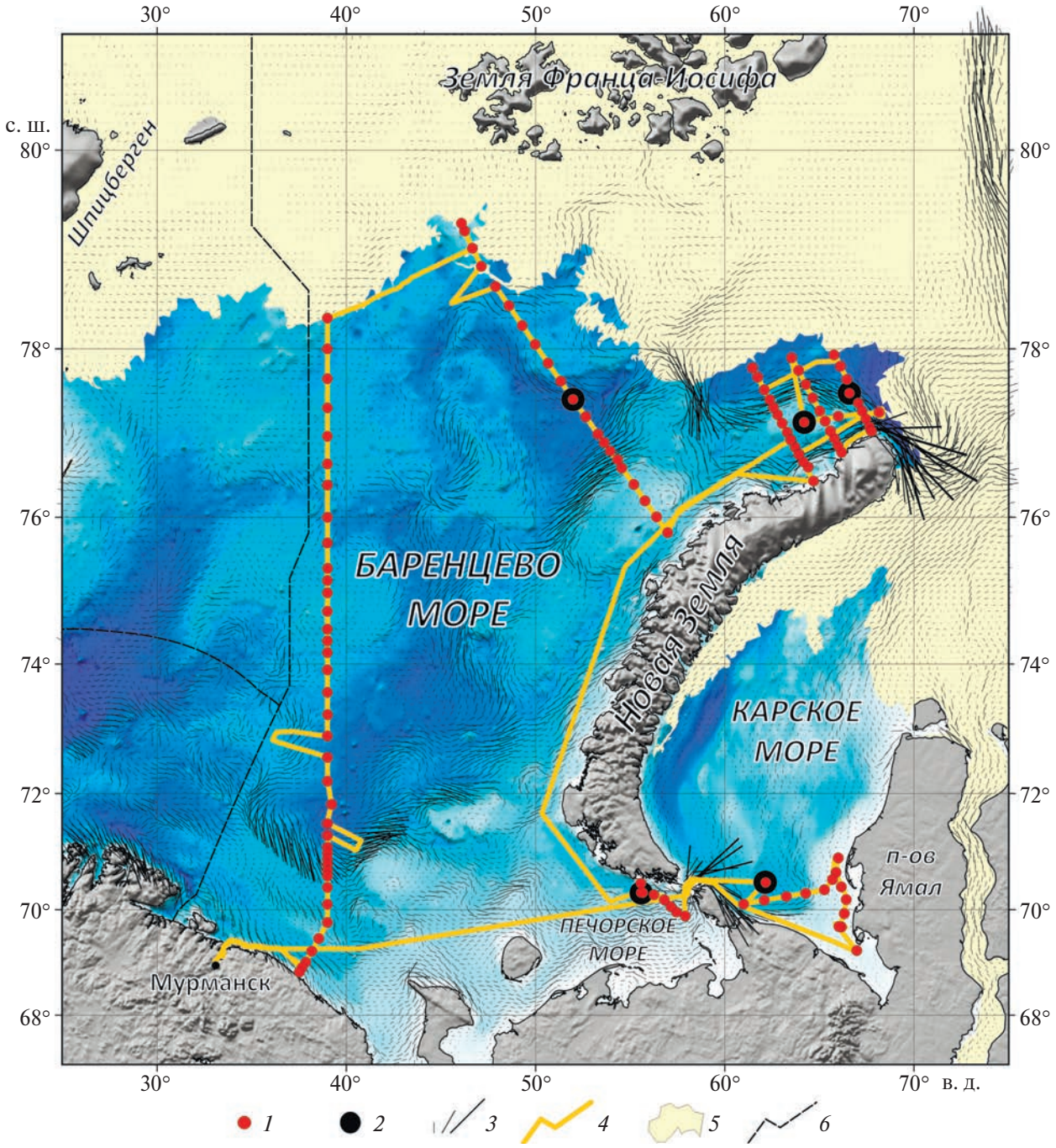

Рис. 1. Карта маршрута экспедиции и океанологических станций в российской части Западно-Арктического шельфа Евразии, ноябрь–декабрь 2023 г.: *1* – станции комплексные; *2* – станции комплексные с отбором колонок осадков с помощью геологической ударной трубки большого диаметра; *3* – векторы течений; *4* – маршрут судна; *5* – ледяной покров; *6* – границы экономических зон РФ и Норвегии, рыбоохранной зоны Шпицбергена.
Векторы течений построены на основе реанализа (http://bulletin.mercator-ocean.fr/en/PSY4#3/75.50/-51.33) и даны по работе [9]. Положение кромки ледяного покрова показано на дату работы в этой части акватории по данным Норвежского метеорологического института, https://cryo.met.no. Батиметрическая основа по GEBCO, https://www.gebco.net.

порядка нескольких сотен мкг$CH_4 \times м^{-2} \times ч^{-1}$ в акватории Байдарацкой губы, достигающая локально единиц мг$\times м^{-2} \times ч^{-1}$ за счет всплытия газовых пузырьков на Приямальском шельфе в результате флюидной разгрузки метана из донных осадков. Наибольшие концентрации метана в водной толще и осадках определялись в Байдарацкой губе и Печорском море. В этом районе концентрация метана в атмосфере приводного слоя достигала 2118 ppb. Фоновые значения концентрации метана превышали 2018 ppb согласно непрерывным минутным измерениям двумя га-

зоанализаторами: Picarro G2132-I [4] на высоте 19 м над урезом воды и Picarro G4301 [10] – 9 м над урезом воды. Фиксировался устойчивый сток углекислого газа из атмосферы на водную поверхность повсеместно в пределах изученного региона в диапазоне от 15 до 160 мг $CO_2 \times м^{-2} \times ч^{-1}$.

Впервые детально изучена структура Западно-Новоземельского течения на границе Баренцева и Карского морей; оценены вертикальные и латеральные потоки вещества в этом течении, осуществляющем перенос теплой воды североатлантического происхождения в направлении Карского моря со скоростью, достигающей 70 см/с. Выявлено слияние двух ветвей течения вблизи северной оконечности архипелага Новая Земля.

Выполнена подробная гидрологическая съемка в центральной части Баренцева моря на меридиональном разрезе вдоль 39° в.д. – аналоге векового стандартного разреза № 6 “Кольский меридиан” [8]. Для различных форм рельефа выявлены разные стадии конвекции в районах стрежней трех основных ветвей Нордкапского течения и Мурманского прибрежного течения.

Рассчитан зимний запас биогенных элементов в фотическом слое. Определены биогенные элементы, которые будут лимитировать первичную продукцию в весенний период – это, в первую очередь, минеральные формы азота в Байдарацкой губе и растворенный кремний в Баренцевом море. Определены локальные источники образования нефтяной пленки на поверхности воды Баренцева моря. Показано концентрирование углеводородов во льду и подледной воде преимущественно во взвеси.

В районах разгрузки метансодержащих флюидов собрана богатая коллекция донной фауны (10 типов, 107 морфовидов; на данный момент выполнено 43 определения до вида), содержащая, в том числе, две крупные группы седентарных животных – брахиопод (Brachiopoda) и мшанок (Bryozoa). Мшанки представлены широко и насчитывают 22 вида. До сих пор в литературе отсутствует информация о реакции мшанок на поступление метана из осадков. Детально изучается состав и закономерности распределения мейофауны в целях выявления видов-индикаторов метановой разгрузки. Получена первая информация о бионакопительном потенциале (тяжелые металлы, редкоземельные элементы) донной фауны в этих районах.

Получено пять разрезов отложений, перспективных для детальной реконструкции процессов осадконакопления и палеоклимата за последние 10–15 тыс. лет для понимания дальнейшего развития природной среды при современном глобальном потеплении. В колонке из контуритового дрифта Южно-Новоземельского желоба на глубине 4.4 м обнаружен редкий минерал – икаит – палеомаркер среды осадконакопления и разгрузки метансодержащих флюидов. В водной толще Печорского моря зафиксированы новые акустические аномалии, образованные выделением газа из осадочной толщи. Выполнены исследования ранее известных точек газопроявления по материалам недавних геолого-геофизических и геоморфологических экспедиций ИО РАН [3]. На северо-восточном склоне плато Литке (Баренцево море) изучен покмарк диаметром ~250 м и глубиной 10–12 м, при образовании которого выброс материала произошел в северном направлении за счет взрывного выделения газа. Так, накопление и высвобождение значительных объемов метана из осадочных толщ в Арктике [7] сопровождали смену гляциальных и межгляциальных климатических событий.

Благодарности. Авторы благодарят капитана Ю.Н. Горбача, экипаж судна и всех членов экспедиции за помощь и активное участие в проведении исследований.

Источники финансирования. Рейс организован ИО РАН при поддержке Минобрнауки РФ (целевое финансирование морских экспедиционных исследований). Статья подготовлена в рамках госзадания, тема № FMWE-2024-0020. Изучение районов разгрузки метансодержащих флюидов поддержано грантом РНФ № 20-17-00157-П, https://rscf.ru/project/20-17-00157/.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гулев С.К.* Глобальные изменения климата и Мировой океан // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6. С. 25–36.
2. *Матишов Г.Г., Павлова Л.Г.* Соленость в условиях океанического перигляциала в Арктических морях // Доклады РАН. 1999. Т. 367. № 1. С. 115–116.
3. *Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Ананьев Р.А. и др.* Исследования в Баренцевом и Карском морях в 52-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 499–501.
4. *Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Белоусов В.А. и др.* Наблюдения концентраций метана, озона, черного углерода, оксидов азота, углерода и содержания $\delta^{13}C–CH_4$ над морями российской Арктики с борта научно-исследовательского судна летом

и осенью 2018 года // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 685–695.

5. *Решетников М.Г.* Климатическая политика в России: Наука, технологии, экономика // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6. С. 6–10.
6. Система Баренцева моря / А.П. Лисицын (отв. ред.) М.: ГЕОС, 2021. 672 с.
7. *Himmler T., Sahy D., Martma T. et al.* A 160,000-year-old history of tectonically controlled methane seepage in the Arctic // Science Advances. 2019. V. 5(8). 1450.
8. *Ivanov V.V., Frolov I.E., Filchuk K.V.* Transformation of Atlantic water in the north-eastern Barents Sea in winter // Arctic and Antarctic Research. 2020. V. 66(3). P. 242–262.
9. *Ivanov V.V., Tuzov F.K.* Formation of dense water dome over the Central Bank under conditions of reduced ice cover in the Barents Sea // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2021. 103590.
10. Pestunov *D.A., Shamrin A.M., Shmargunov V.P., Panchenko M.V.* Gas-analytic measurement complexes of Baikal atmospheric-limnological observatory // Proc. SPIE9680. 21st Int. Symp. Atmosph. Ocean Optics: Atmosph. Physics. 2015. https://doi.org/10.1117/12.2205538

93th CRUISE OF THE RESEARCH VESSEL *AKADEMIK MSTISLAV KELDYSH*: GEOSYSTEMS OF THE WESTERN EURASIAN ARCTIC SHELVES IN THE SEASON OF ACTIVE AUTUMN-WINTER CONVECTION AND POLAR NIGHT

M. D. Kravchishina[a, *], A. A. Klyuvitkin[a], A. N. Novigatsky[a], A. G. Matul[a], V. V. Ivanov[b], D. A. Pestunov[c], Y. A. Shtabkin[d], B. V. Baranov[a], S. V. Galkin[a], A. K. Ambrosimov[a], N. V. Kozina[a], O. N. Lukianova[a], I. A. Nemirovakaya[a]

[a] *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[b] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[c] *V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Tomsk, Russia*
[d] *A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
** e-mail: kravchishina@ocean.ru*

Multidisciplinary studies of “sediments–water column–atmospheric layer near sea surface” system in the Barents and Pechora seas and the Baidaratskaya Bay of the Kara Sea were carried out in the expedition of “European Arctic–2023: Geological Record of Environmental and Climate Change” during the season of polar night and active development of autumn-winter thermal convection. Fundamentally new data on a number of areas of oceanology were obtained in the cruise.

Keywords: sedimentation, biogeochemistry, climate, methane, paleoceanography, Arctic