

УДК 550.42

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-6-67-76

## РАДИОАКТИВНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ ЧАУНСКОЙ ГУБЫ. АНАЛИЗ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Александр Сергеевич Ульянцев<sup>1</sup>✉, Сергей Игоревич Иванников<sup>2</sup>,  
Светлана Юрьевна Братская<sup>3</sup>, Александр Николаевич Чаркин<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия; uleg85@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0003-2230-1069>

<sup>2</sup> Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия; yajkfqn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5889-3409>

<sup>3</sup> Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия; s.bratskaya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4954-0422>

<sup>4</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия; charkin@poi.dvo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9273-9950>

**Аннотация.** В статье представлены данные о пространственном распределении активной концентрации природных ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) и техногенных ( $^{137}\text{Cs}$ ) радионуклидов в поверхностном слое донных осадков Чаунской губы Восточно-Сибирского моря. Измеренная активная концентрация  $^{232}\text{Th}$  и  $^{226}\text{Ra}$  типична для донных отложений прибрежно-шельфовой зоны Арктики и соответствует общемировому уровню. Уровень активности  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях показал отсутствие локальных источников антропогенного загрязнения в Чаунской губе, в то время как средняя концентрация активности  $^{40}\text{K}$  в 1,8 раза превышала общемировую. Результаты статистического анализа полученных данных показали, что динамика речного стока, термоабразии и течений, а также эолового и ледового переноса осадочного вещества, являются основными факторами, определившими различия в поведении исследованных радионуклидов в поверхностных донных осадках Чаунской губы.

**Ключевые слова:** Арктика, морские осадки, гамма-спектрометрия, природные радионуклиды, радиоцезий, факторный анализ

**Для цитирования:** Ульянцев А.С., Иванников С.И., Братская С.Ю., Чаркин А.Н. Радиоактивность поверхностных донных осадков Чаунской губы. Анализ природных и антропогенных факторов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 6. С. 67–76.

## RADIOACTIVITY OF SURFACE MARINE SEDIMENTS OF THE CHAUN BAY. ANALYSIS OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC ENVIRONMENTAL FACTORS

Aleksandr S. Ulyantsev<sup>1</sup>✉, Sergey I. Ivannikov<sup>2</sup>, Svetlana Yu. Bratskaya<sup>3</sup>,  
Aleksandr N. Charkin<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, Russia; uleg85@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0003-2230-1069>

<sup>2</sup> Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia; yajkfqn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5889-3409>

<sup>3</sup> Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia; s.bratskaya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4954-0422>

<sup>4</sup> Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia; charkin@poi.dvo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9273-9950>

**Abstract.** The paper presents data on the spatial distribution of activity concentration of natural ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) and anthropogenic ( $^{137}\text{Cs}$ ) radionuclides in the surface layer of bottom sediments of the Chaun Bay of the East Siberian Sea. The measured activity of  $^{232}\text{Th}$  and  $^{226}\text{Ra}$  is typical for bottom sediments of the Arctic coastal zone and corresponds to the global level. The level of  $^{137}\text{Cs}$  activity in bottom sediments showed the absence of local sources of anthropogenic contamination in Chaun Bay, while the mean  $^{40}\text{K}$  activity concentration was 1.8 times higher than the global average. The results of statistical analysis showed that the dynamics of riverine run-off, thermoabrasion and currents, as well as aeolian and sea ice transport of sedimentary matter, are the main factors that determined the differences in the behaviour of the studied radionuclides in the surface bottom sediments of the Chaun Bay.

**Keywords:** Arctic, marine sediments, gamma-ray spectrometry, natural radionuclides, radiocesium, factor analysis

**For citation:** Ulyantsev A.S., Ivannikov S.I., Bratskaya S.Yu., Charkin A.N. Radioactivity of surface marine sediments of the Chaun Bay. Analysis of natural and anthropogenic environmental factors. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 6: 67–76. (In Russ.).

**Введение.** Арктика является зоной приоритетных национальных интересов России, освоение которой напрямую зависит от изученности этой сложной природной системы. Актуальность изучения прибрежно-шельфовой зоны арктических морей России определяется современными изменениями климата в Арктике, способствующими разгрузке многолетнемерзлых толщ, термоабразии и эрозии берегов, дегазации дна, ледовой экзарации [Дударев и др., 2016; Лобковский и др., 2013; Bröder et al., 2019; Günther et al., 2015; Overduin et al., 2014; Shakhova et al., 2017; Vonk et al., 2012]. При этом мониторинг загрязнений, в том числе радиоактивных, является актуальной задачей в рамках освоения арктического пространства и эксплуатации Северного морского пути.

Активная концентрация природных радионуклидов (например, изотопов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ), а также их соотношения, являются информативным индикатором геологических и геохимических процессов в океане [например, Доманов и др., 2014; 2019; Abril, Fraga, 1996; Ligeró et al., 2001, Charkin et al., 2022; Abassi et al., 2020]. В морских осадках радионуклиды тория, радия и калия как правило включены в кристаллическую решетку минералов, могут быть адсорбированы непосредственно из водной толщи на глинистых частицах [Abril, Fraga, 1996; Ligeró et al., 2001] или связаны с органическим веществом (ОВ) [Доманов и др., 2014, 2019]. Соответственно, вариации концентрации природных радионуклидов в осадках связаны с различиями их литологического состава, а также состава и концентрации ОВ. В свою очередь, концентрация в осадках радиоцезия ( $^{137}\text{Cs}$ ) отражает техногенное загрязнение морской среды [Саркисов, 2019; Мирошников, 2012; Мирошников и др., 2017, 2020аb]. В настоящее время поведение радиоцезия и его распределение в донных осадках активно изучаются для оценки потенциальной опасности в морской среде [например, Abassi et al., 2019, 2022; Alshahri, 2017; Mehnati et al., 2022; Nguyen et al., 2020], в том числе в Арктике [Саркисов, 2019; Budko et al., 2022; Мирошников и др., 2020аb; Yushin et al., 2023]. Кроме того, усиление антропогенного воздействия на Северный Ледовитый океан связано с вводом в эксплуатацию первой российской плавучей атомной электростанции «Академик Ломоносов», базирующейся в порту Певек в Чаунской губе Восточно-Сибирского моря. Таким образом, основной целью данной работы было выявление особенностей пространственного распределения активной концентрации естественных ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) и антропогенных ( $^{137}\text{Cs}$ ) радионуклидов в поверхностных морских осадках Чаунской губы и оценка их связи с гранулометрическим составом и концентрацией ОВ.

**Материалы и методы исследований.** Материалом для исследования послужили донные осадки, собранные в акватории Чаунской губы Восточно-Сибирского моря на 25 станциях в 60-м рейсе НИС

«Академик Опарин» [Ульянцев и др., 2021]. В качестве инструмента сбора материала с борта судна использовали коробчатый пробоотборник типа Экман (0,5 м × 0,5 м × 1,0 м). Сбор донных осадков на мелководье производился ручным дночерпателем типа Ван Вин (25 см × 15 см × 15 см) с моторно-гребной лодки Чирок-320Т. Для анализов отбирали верхний 10-сантиметровый слой донных осадков. Пробы для гранулометрического анализа (10–20 г влажного осадка) отбирали в полипропиленовые пакеты и хранили при температуре +4 °С до проведения лабораторных анализов. Для определения концентрации органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) 10–20 г влажного осадка отбирали в полипропиленовые пакеты и хранили при температуре –18 °С. Для анализов пробы были лиофилизированы и измельчены с помощью шаровой мельницы. Для гамма-спектрометрического анализа активности радионуклидов около 1,5 кг влажного осадка отбирали в контейнеры из нержавеющей стали и высушивали до постоянной массы при +50 °С в течение 48 часов). Схема расположения станций приведена на рис. 1.

Гранулометрический анализ осадков и выполнен во влажных пробах методом лазерной дифракции после мокрого рассева песчаной фракции [Ульянцев и др., 2020]. Навеску (2–3 г) помещали в мерный стакан, туда же добавляли 20 мл дистиллированной воды и 20 мл 0,7% раствора гексаметафосфата натрия, после чего проба оставлялась на сутки. Песчаную фракцию отделяли на сите с диаметром

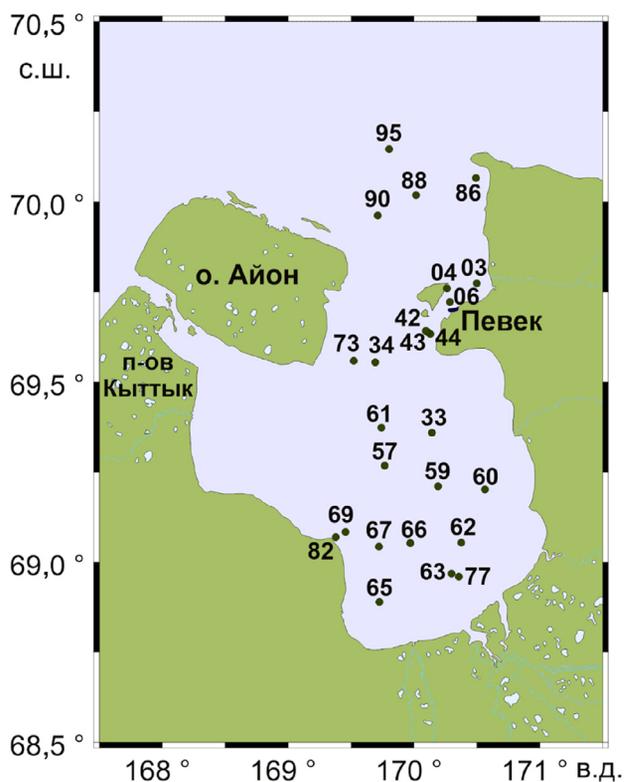


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора донных осадков в Чаунской губе

отверстий 0,063 мм, после чего расситовывали на фракции 0,063–0,125, 0,125–0,25, 0,25–0,5, 0,5–1, 1–2 и >2 мм. Разделенные таким образом фракции высушивали до постоянной массы и взвешивали с точностью 0,01 г. Определение массового распределения частиц тоньше 63 мкм выполнено на анализаторе частиц SALD 2300 (Шимадзу, Япония) с использованием жидкостного модуля диспергирования при постоянном перемешивании после ультразвукового воздействия. Дисперсант и фоновая жидкость — дистиллированная вода. Определение концентрации  $C_{орг}$  выполнено в высушенных и измельченных пробах осадков методом высокотемпературного сжигания на анализаторе ТОС-LCPN (Шимадзу, Япония). Точность измерения составляла  $\pm 3\%$  по результатам трех параллельных измерений.

Измерения активности радионуклидов выполнены на гамма-спектрометрическом комплексе, включающем блок измерения SBS-75 (Грин Стар Технолоджиз, Россия) и полупроводниковый германиевый детектор GC2018 (Канберра, США). Относительная эффективность регистрации комплекса в пике 1332 кэВ — 20%. Полная ширина полувысоты (ПШПВ) комплекса в пике 1332 кэВ = 1,8 кэВ. Объем проб, использованных для анализа — от 500 до 1000 мл. Геометрия измерения — Маринелли. Для измерения удельной активности использовалась программа eSBS Version 1.5.9.3, для обработки результатов измерений применялась программа «Гамма-анализатор для полупроводниковых детекторов (ППД)» версии 1.0. Для калибровки гамма-спектрометра применялись закрытые эталонные точечные источники гамма-излучения типа ОСГИ-3-2 ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ), расположенные непосредственно на торце детектора.

Активность природных радионуклидов определяли для  $^{226}\text{Ra}$  по продуктам распада:  $^{214}\text{Pb}$  (351,9 кэВ) и  $^{214}\text{Bi}$  (609,3 и 1120,3 кэВ); для  $^{232}\text{Th}$  — по линиям  $^{214}\text{Pb}$  (238,6 кэВ)  $^{208}\text{Tl}$  (583,3 кэВ),  $^{228}\text{Ac}$  (911,0 и 969,0 кэВ); для  $^{40}\text{K}$  — по линии 1460,7 кэВ. Активность радиоцезия ( $^{137}\text{Cs}$ ) определяли по энергии его гамма-излучения 661,6 кэВ. Погрешность измерений в зависимости от интенсивности гамма-линий определяемых радионуклидов составила 1–7%. Удельную активность  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в пробах рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{N_e}{\varepsilon_f P_\gamma t_C M},$$

где  $N_e$  — количество импульсов в пике полного поглощения для энергии  $E$ ;  $\varepsilon_f$  — эффективность детектора при энергии  $E$ ;  $P_\gamma$  — вероятность излучения гамма-излучения (гамма-выход) при энергии  $E$ ;  $t_C$  — время измерения пробы;  $M$  — масса пробы.

При наличии в энергетическом диапазоне более одного пика для радионуклида проводилось усреднение удельной активности путем расчета средневзвешенного значения. Для уменьшения статистической погрешности облучение пробы

проводилось в течение 54 000 с. Фоновые спектры регистрировались для пустого герметичного сосуда Маринелли при тех же условиях и использовались для коррекции площади пиков гамма-излучения измеряемых радионуклидов. Фон вычитался для каждого энергетического перехода.

**Краткая характеристика района исследований.** Чаунская губа расположена в юго-восточной части Восточно-Сибирского моря и представляет собой залив полигональной формы северо-западной пространственной ориентации с множеством впадающих в нее мелких рек [Стремяков, 1963]. Она отличается относительной изолированностью от открытого водного пространства, вдается в материк более чем на 100 км и достигает максимума ширины в 95 км. Полигонально-гундровый ландшафт развит с западной (о. Айон и п-ов Кыттык) и южной сторон, где сосредоточены многочисленные термокарстовые озера, аласы и мелкие реки. Западный берег низменный, восточный — более возвышенный [Экосистемы..., 1994].

**Гранулометрический состав осадков и  $C_{орг}$ .** Данные по гранулометрическому составу и  $C_{орг}$  в исследованных донных осадках представлены в табл. 1. Массовая концентрация песка (> 63 мкм), крупного (10–63 мкм) и тонкого (2–10 мкм) алеврита, а также пелита (< 2 мкм), в исследованных донных осадках колеблется от 0,75 до 96,33 (среднее 25,65%), от 3,67 до 64,13 (среднее 34,65%), от 0,00 до 49,45 (среднее 26,66%) и от 0,00 до 22,60 (среднее 13,04%) соответственно. Концентрация  $C_{орг}$  изменяется от 0,33 до 2,60% (среднее 1,50%). Максимальные концентрации  $C_{орг}$  отмечены в центральной части Чаунской губы, где распространены тонкозернистые осадки. Более низкие концентрации  $C_{орг}$  соответствуют песчаным и алеврито-песчаным отложениям. В целом, характер распределения  $C_{орг}$  в осадках согласуется с их гранулометрическим составом (рис. 2), что было подтверждено статистически.

В западной и южной частях губы распространены наиболее грубозернистые осадки. В западной части губы гранулометрический состав осадков определяется динамикой термоабразии широко развитых здесь полигонально-гундровых многолетнемерзлых отложений, и широтное распространение осадков связано с влиянием приходящего с севера течения [Экосистемы..., 1994]. Южная часть Чаунской губы больше подвержена влиянию речного стока, также несущего значительное количество продуктов термоабразии. Как и в западной части губы, здесь распространены осадки песчаной и алеврито-песчаной размерности. В восточной части Чаунской губы сосредоточены осадки алевритовой размерности. Как и в случае грубозернистых осадков, распространение алевритов сопряжено с динамикой речного стока, термоабразии и течениями, а наблюдающиеся пространственные флуктуации связаны, по-видимому, с влиянием сезонной ледовой разгрузки и эоловой транспортировки осадочного вещества.

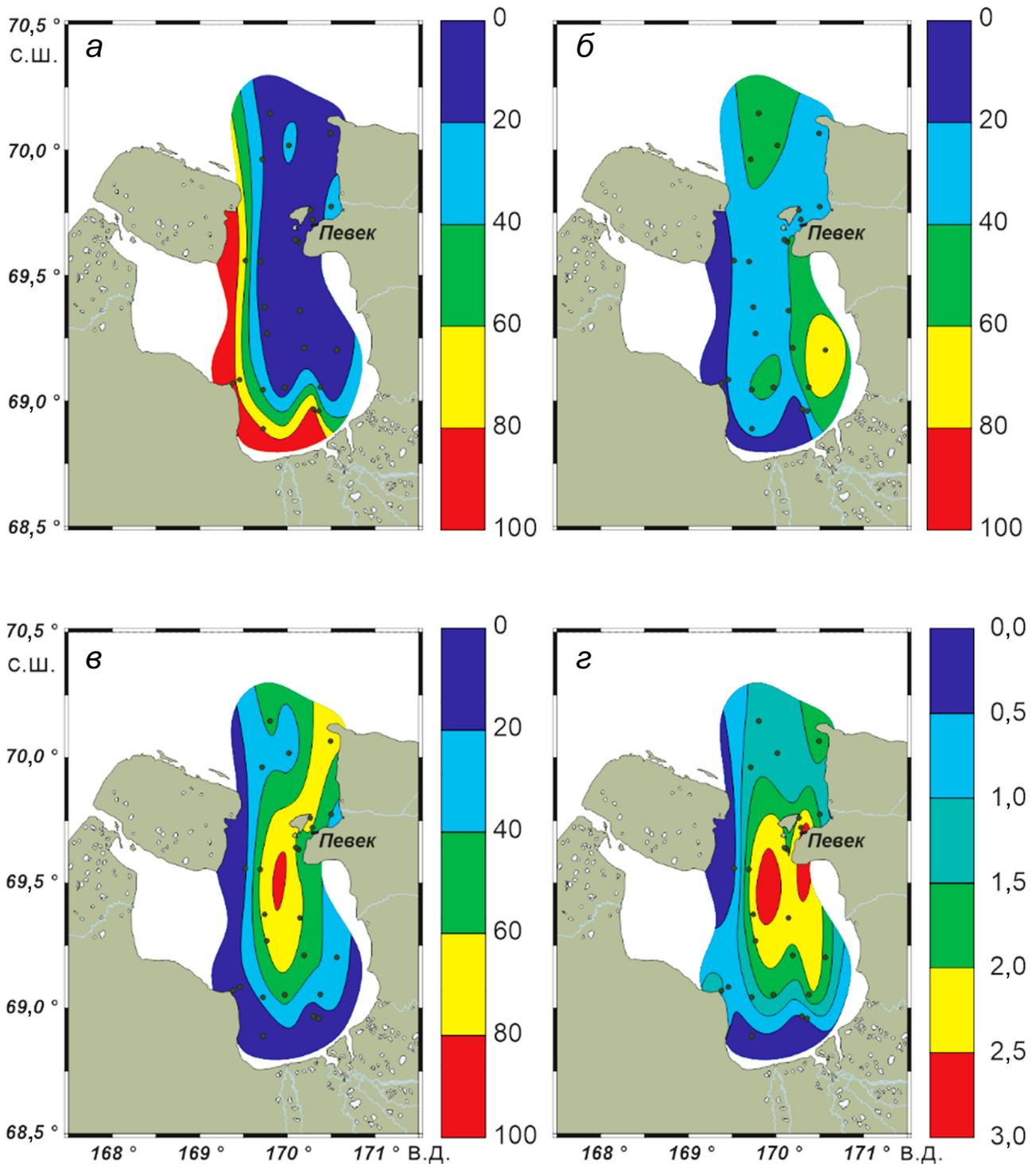


Рис. 2. Поверхностные распределения массового содержания размерных фракций  $>63$  мкм (а), 10–63 мкм (б), суммы 2–10 +  $<2$  мкм (в) и концентрации  $C_{орг}$  (г) в исследованных донных осадках

В центральной части губы и на выходе в Восточно-Сибирское море распространены осадки алеврито-пелитовой и пелитовой размерности. Такая зональность связана с изолированностью от влияния речного стока и термоабразии и сопряжена с течениями, способствующими гидродинамической сортировке наиболее тонкозернистых фракций. Основную площадь центральной и горловой части исследованной акватории занимают осадки алеври-

то-пелитовой размерности, распределение которых также связано с удаленностью от влияния речного стока, абразии и термоабразии, а изменчивости гранулометрического состава способствует динамика течений, сезонность ледостава и эолового распространения частиц.

**Радионуклиды.** Измеренная в осадках активная концентрация природных радионуклидов меняется от 23,7 до 77,9 (ср.  $39,2 \pm 10$ ) Бк/кг для  $^{232}\text{Th}$ , от 16,5

Таблица 1

**Координаты станций пробоотбора, данные по гранулометрическому составу и концентрации  $C_{орг}$  в исследованных донных осадках Чаунской губы**

Станция	Широта, °С.ш.	Долгота, °В.д.	Массовое содержание фракций, %				$C_{орг}$ , %
			>63 мкм	10–63 мкм	2–10 мкм	<2 мкм	
03	69,772	170,503	27,58	35,50	25,51	11,41	1,20
04	69,759	170,266	2,31	27,95	47,73	22,01	2,00
06	69,720	170,288	9,76	32,36	39,11	18,77	2,60
33	69,358	170,146	2,93	35,90	42,13	19,04	2,30
34	69,554	169,695	2,18	35,26	41,21	21,35	2,10
42	69,640	170,098	9,64	32,03	39,84	18,49	1,97
43	69,637	170,112	18,44	37,31	30,02	14,23	1,70
44	69,632	170,132	8,57	40,37	34,19	16,87	1,89
57	69,267	169,772	5,73	28,73	42,94	22,60	2,11
59	69,209	170,195	6,67	43,22	33,28	16,83	1,87
60	69,201	170,569	7,99	64,13	19,87	8,01	1,69
61	69,372	169,744	0,75	29,09	49,45	20,71	2,39
62	69,053	170,380	9,07	60,21	21,59	9,13	1,93
63	68,967	170,302	75,80	14,36	6,46	3,38	0,51
65	68,888	169,728	74,93	23,64	1,02	0,41	0,33
66	69,052	169,974	8,79	42,86	31,55	16,80	1,61
67	69,043	169,726	32,33	40,26	17,55	9,86	1,21
69	69,082	169,460	64,10	23,42	8,54	3,94	0,59
73	69,558	169,523	62,47	19,98	11,48	6,07	0,42
77	68,958	170,358	57,27	29,28	8,92	4,53	0,68
82	69,065	169,359	96,33	3,67	0,00	0,00	1,01
86	70,064	170,497	3,08	31,26	43,34	22,32	1,75
88	70,017	170,020	23,77	44,88	20,19	11,16	1,09
90	69,961	169,714	20,87	43,52	23,06	12,55	1,33
95	70,145	169,807	9,85	47,09	27,45	15,61	1,13

до 39,3 (ср.  $26,6 \pm 4,4$ ) Бк/кг для  $^{226}\text{Ra}$  и от 535 до 991 (ср.  $726 \pm 109$ ) Бк/кг для  $^{40}\text{K}$ . Отношение  $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$  меняется от 1,14 до 2,38 (ср.  $1,50 \pm 0,26$ ), активная концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в меняется от 0,5 до 4,7 (ср.

$2,0 \pm 1,1$ ) Бк/кг. Схемы распределения активностей изученных радионуклидов представлены на рис. 3. В целом, средняя измеренная активность  $^{232}\text{Th}$  и  $^{226}\text{Ra}$  в осадках Чаунской губы согласуется с данными, полученными для шельфа Восточной Арктики [Charkin et al., 2022], а также со среднемировыми значениями [UNSCEAR, 2000]. Соотношение  $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$  также согласуются с глобальными значениями, однако измеренная средняя активная концентрация  $^{40}\text{K}$  в осадках Чаунской губы оказалась в 1,8 раза выше по сравнению с Восточно-Сибирским морем [Charkin et al., 2022] и общемировым уровнем [UNSCEAR, 2000].

В юго-западной части губы отмечена максимальная активность  $^{232}\text{Th}$  (ст. 67, 82),  $^{226}\text{Ra}$  (ст. 67, 69, 82) и  $^{40}\text{K}$  (ст. 67 и 69), где сосредоточены осадки песчаной и алеврито-песчаной размерности. Повышенная активность  $^{232}\text{Th}$  ( $> 45$  Бк/кг) отмечена в центральной части губы (ст. 57 и 61),  $^{226}\text{Ra}$  ( $>30$  Бк/кг) — в юго-восточной части (ст. 77),  $^{40}\text{K}$  ( $>800$  Бк/кг) — в центральной и юго-восточной частях (ст. 61, 63, 77). Северная и южная часть губы отличаются пониженной активностью природных радионуклидов. Величина соотношения  $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$  во всех исследованных осадках  $>1,0$ . Максимум  $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$  отмечен также на ст. 82, а повышенные значения встречаются в центральной части губы (ст. 57 и 61). Для исследованных донных осадков отмечена повышение активности природных радионуклидов с ростом концентрации песчаной фракции. В свою очередь максимальная активность  $^{137}\text{Cs}$  измерена в осадках из центральной части Чаунской губы, представленных пелитами и алевритовыми пелитами, что указывает на концентрирование  $^{137}\text{Cs}$  в глинистой фракции.

**Корреляционный анализ.** Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 2. Для исследованных морских осадков отмечена значимая ( $p < 0,05$ ) отрицательная связь процентного вклада песка ( $>63$  мкм) с остальными размерными фракциями (в парах  $>63$  мкм–10–63 мкм,  $>63$  мкм–2–10 мкм и  $>63$  мкм– $<2$  мкм  $r = -0,67, -0,89$  и  $-0,89$  соответственно), а также с  $^{137}\text{Cs}$  и  $C_{орг}$ . Первое, по-видимому, указывает на весовой антагонизм песка и более

Таблица 2

**Корреляционная матрица Пирсона для изученных параметров донных осадков Чаунской губы ( $n = 25$ )**

Параметры	> 63 мкм	10–63 мкм	2–10 мкм	< 2 мкм	$^{232}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{40}\text{K}$	$^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$	$^{137}\text{Cs}$	$C_{орг}$
> 63 мкм	–									
10–63 мкм	<b>-0,671</b>	–								
2–10 мкм	<b>-0,895</b>	0,272	–							
< 2 мкм	<b>-0,892</b>	0,275	<b>0,984</b>	–						
$^{232}\text{Th}$	0,406	-0,411	-0,271	-0,303	–					
$^{226}\text{Ra}$	0,380	-0,050	-0,460	-0,463	<b>0,594</b>	–				
$^{40}\text{K}$	0,316	-0,332	-0,208	-0,216	<b>0,550</b>	<b>0,678</b>	–			
$^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$	0,074	-0,439	0,176	0,140	<b>0,695</b>	-0,149	0,115	–		
$^{137}\text{Cs}$	<b>-0,644</b>	0,163	<b>0,752</b>	<b>0,698</b>	0,038	-0,333	-0,091	0,402	–	
$C_{орг}$	<b>-0,841</b>	0,366	<b>0,884</b>	<b>0,840</b>	-0,044	-0,323	-0,203	0,317	<b>0,738</b>	–

Примечание. Значимые ( $p < 0,05$ ) корреляции выделены полужирным.

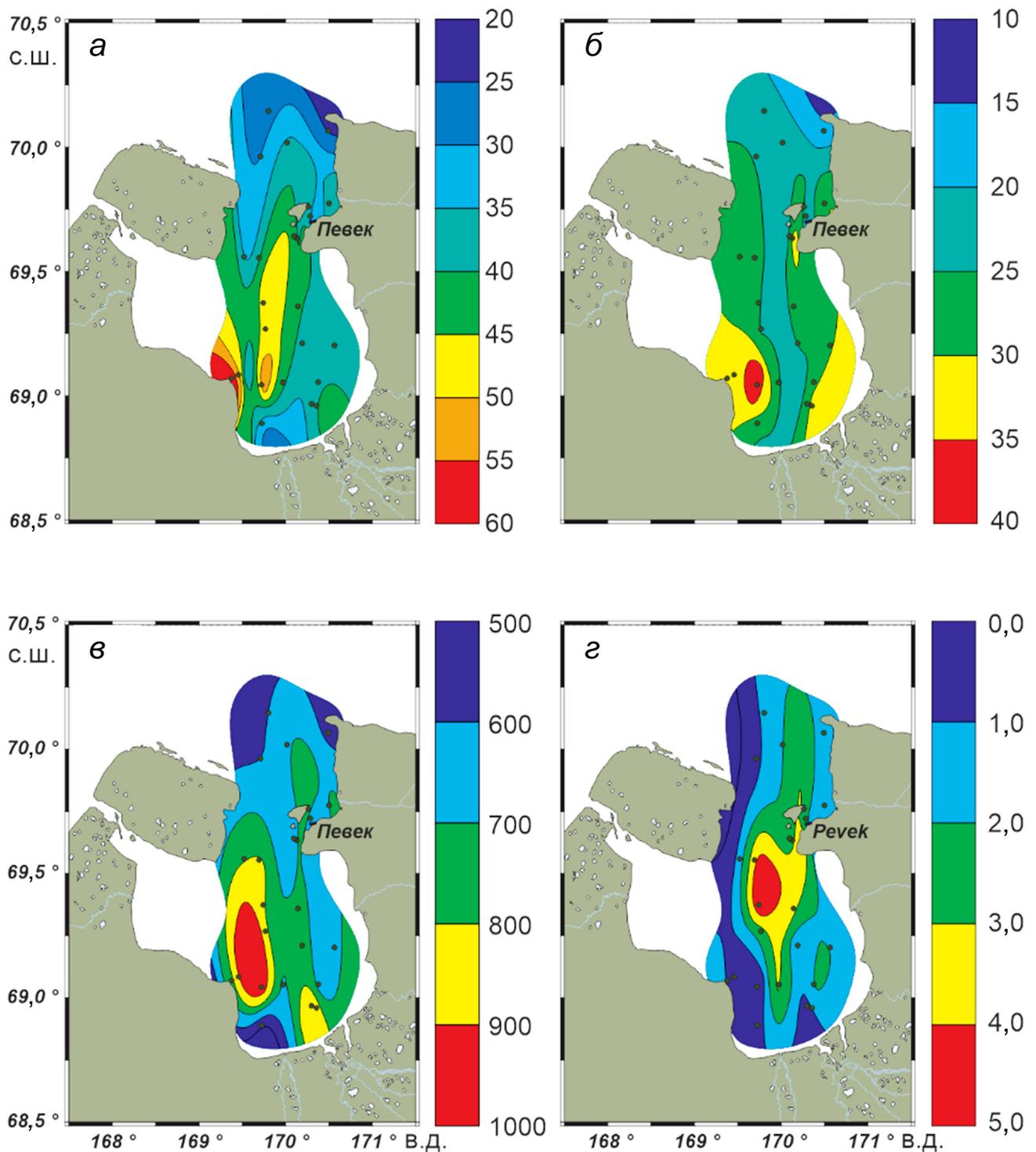


Рис. 3. Поверхностные распределения активной концентрации радионуклидов  $^{232}\text{Th}$  (а),  $^{226}\text{Ra}$  (б),  $^{40}\text{K}$  (в) и  $^{137}\text{Cs}$  (г) в исследованных донных осадках

тонких фракций, второе — на концентрирование  $^{137}\text{Cs}$  и органического вещества преимущественно в тонкозернистых фракциях. Последнее подтверждается положительной корреляцией  $^{137}\text{Cs}$  и  $C_{\text{орг}}$  с 2–10 мкм ( $r=0,75$  и  $0,88$  соответственно) и <2 мкм ( $r=0,70$  и  $0,84$  соответственно). В свою очередь, значительная корреляция между фракциями 2–10 мкм и <2 мкм ( $r=0,98$ ) отражает их родственный генезис и равный вклад в массу осадка.

Среди естественных радионуклидов отмечены положительные линейные корреляции  $^{232}\text{Th}$  с  $^{226}\text{Ra}$  ( $r=0,59$ ),  $^{40}\text{K}$  ( $r=0,55$ ), отношением  $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$  ( $r=0,69$ ), а также в паре  $^{226}\text{Ra}$ – $^{40}\text{K}$  ( $r=0,68$ ), что, в целом, характерно для морей Восточно-Арктического шельфа [Charkin et al., 2022]. Корреляция  $^{232}\text{Th}$ – $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$  указывает на определяющий вклад изотопов тория в величину отношения  $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$ . Положительная корреляция  $^{137}\text{Cs}$ – $C_{\text{орг}}$  ( $r=0,74$ ),

по-видимому, связана с единым аффинитетом органического вещества и <sup>137</sup>Cs к глинистым минералам, сосредоточенным в тонкозернистой фракции осадков. Следует отметить, что для природных радионуклидов не обнаружено значимой линейной корреляции ни с одной из исследованных гранулометрических фракций. Предположительно, это связано с разнообразием обстановок седиментации в Чаунской губе, выраженной полимиктовостью донных осадков и их различным происхождением. Тем не менее, общая тенденция совместного роста активности природных радионуклидов в исследованных донных осадках статистически подтверждена.

**Факторный анализ.** Результаты факторного анализа представлены в табл. 3. Для фактора F1, объясняющего 49,5% дисперсии, значимые положительные нагрузки отмечены для >63 мкм и <sup>226</sup>Ra, отрицательные — для 2–10, <2 мкм, <sup>137</sup>Cs и C<sub>орг</sub>. Значительные величины факторных нагрузок 2–10 мкм (–0,94) и <2 мкм (–0,93) указывают не только на их равный взаимный вклад, но и родственное (обломочное) происхождение в осадках, что согласуется высоким значением коэффициента корреляции Пирсона между этими фракциями (r = 0,98). Значительная положительная нагрузка F1 для >63 мкм (0,95) подтверждает антагонизм весового вклада песка в осадках по сравнению с тонкозернистыми фракциями. Значимые отрицательные нагрузки <sup>137</sup>Cs и C<sub>орг</sub> (–0,75 и –0,88 соответственно) наряду с их отрицательной корреляцией с содержанием песка (r = –0,64 и –0,84 соответственно) подтверждают их концентрирование радиоцезия и ОВ в глинистых фракциях осадков [Мирошников и др., 2020; Budko et al., 2022; Koarashi et al., 2016; Basuki et al., 2018].

Таблица 3

Значения факторных нагрузок измеренных параметров донных осадков Чаунской губы (n = 25)

Параметр	F1	F2	F3	F4
> 63 мкм	<b>0,949</b>	0,072	–0,286	–0,041
10–63 мкм	–0,482	–0,479	<b>0,530</b>	0,467
2–10 мкм	<b>–0,944</b>	0,205	0,056	–0,214
< 2 мкм	<b>–0,931</b>	0,162	0,055	–0,246
<sup>232</sup> Th	0,422	<b>0,840</b>	0,127	0,297
<sup>226</sup> Ra	<b>0,593</b>	0,261	<b>0,718</b>	0,057
<sup>40</sup> K	0,438	<b>0,531</b>	<b>0,521</b>	–0,419
<sup>232</sup> Th/ <sup>226</sup> Ra	–0,086	<b>0,845</b>	–0,423	0,260
<sup>137</sup> Cs	<b>–0,748</b>	0,449	–0,006	0,020
C <sub>орг</sub>	<b>–0,878</b>	0,327	0,133	0,119

Примечание. Полу жирным выделены значимые факторные нагрузки.

Несмотря на то, что для <sup>226</sup>Ra прослеживается слабая корреляция с гранулометрическим составом донных осадков, для него отмечена значимая факторная нагрузка F1 (0,59). Для <sup>232</sup>Th и <sup>40</sup>K эти величины ниже (0,42 и 0,44 соответственно), однако их

положительные значения, близкие к 0,5, позволяют заключить преимущественное концентрирование природных радионуклидов в песчаной фракции осадков. При этом ослабевание линейной корреляции активности <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra и <sup>40</sup>K, скорее всего, вызвано региональными особенностями седиментации в Чаунской губе. Результаты факторного анализа, в целом, согласуются с результатами корреляционного анализа и позволяют заключить, что фактор F1, разделивший большинство проанализированных параметров, является литогенным, отражающим генезис осадочного вещества и пространственную изменчивость механизмов седиментации (термоабразии, абразии берегов, речного стока).

Фактор F2 объясняет 23,8% дисперсии. Значимые положительные нагрузки отмечены для <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K и отношения <sup>232</sup>Th/<sup>226</sup>Ra. Положительная корреляция в паре <sup>232</sup>Th–<sup>232</sup>Th/<sup>226</sup>Ra (r = 0,69) подтверждает относительно равномерный вклад <sup>232</sup>Th и <sup>226</sup>Ra независимо от гранулометрических характеристик донных осадков. Положительную нагрузку <sup>40</sup>K можно объяснить попутным накоплением этого радионуклида вместе с <sup>232</sup>Th (r = 0,55). В отличие от F1, фактор F2 является концентрационным и связан с различной степенью связывания <sup>232</sup>Th и <sup>40</sup>K с минеральной матрицей. На рис. 4 приведены поверхностные распределения массового содержания фракции >63 мкм, активной концентрации <sup>232</sup>Th и соответствующих им значений F1 и F2.

Положительные значимые нагрузки третьего фактора (F3), объясняющего 13,7% дисперсии, отмечены для радионуклидов <sup>226</sup>Ra и <sup>40</sup>K, а также фракции 10–63 мкм. Как и в случае с F2, здесь имеет место попутное накопление <sup>226</sup>Ra с <sup>40</sup>K (r = 0,68). По смыслу фактор F3 аналогичен F2. Разделение же радионуклидов по факторным группам вызвано разобщенностью их концентрирования на минеральной матрице разных размерных фракций осадков. Для фактора F4 с объясняемой дисперсией 6,7% значимых величин факторных нагрузок не обнаружено.

Для фракции 10–63 мкм наблюдаются достаточно значимые величины факторных нагрузок F1–F4, а единственная значимая корреляция с концентрацией песка (r = –0,67) слабее по сравнению с 2–10 мкм и <2 мкм. Это связано с особенностями генезиса и распространения частиц этой размерности. Например, в криогенных отложениях массовое содержание и состав частиц размером 10–63 мкм, часто относимых к «лессовой» фракции, информативны как индикатор их эолового происхождения [Schirmermeister et al., 2003; Strauss et al., 2012]. Полигонально-тундровый ландшафт, развитый в западной и южной частях Чаунской губы, способствует поступлению в осадки частиц песчаной и крупноалевритовой размерности в результате разгрузки прибрежных многолетнемерзлых толщ. В распространении крупноалевритовой фракции также участвуют эоловый перенос и ледовая седиментация, носящая сезонный характер.

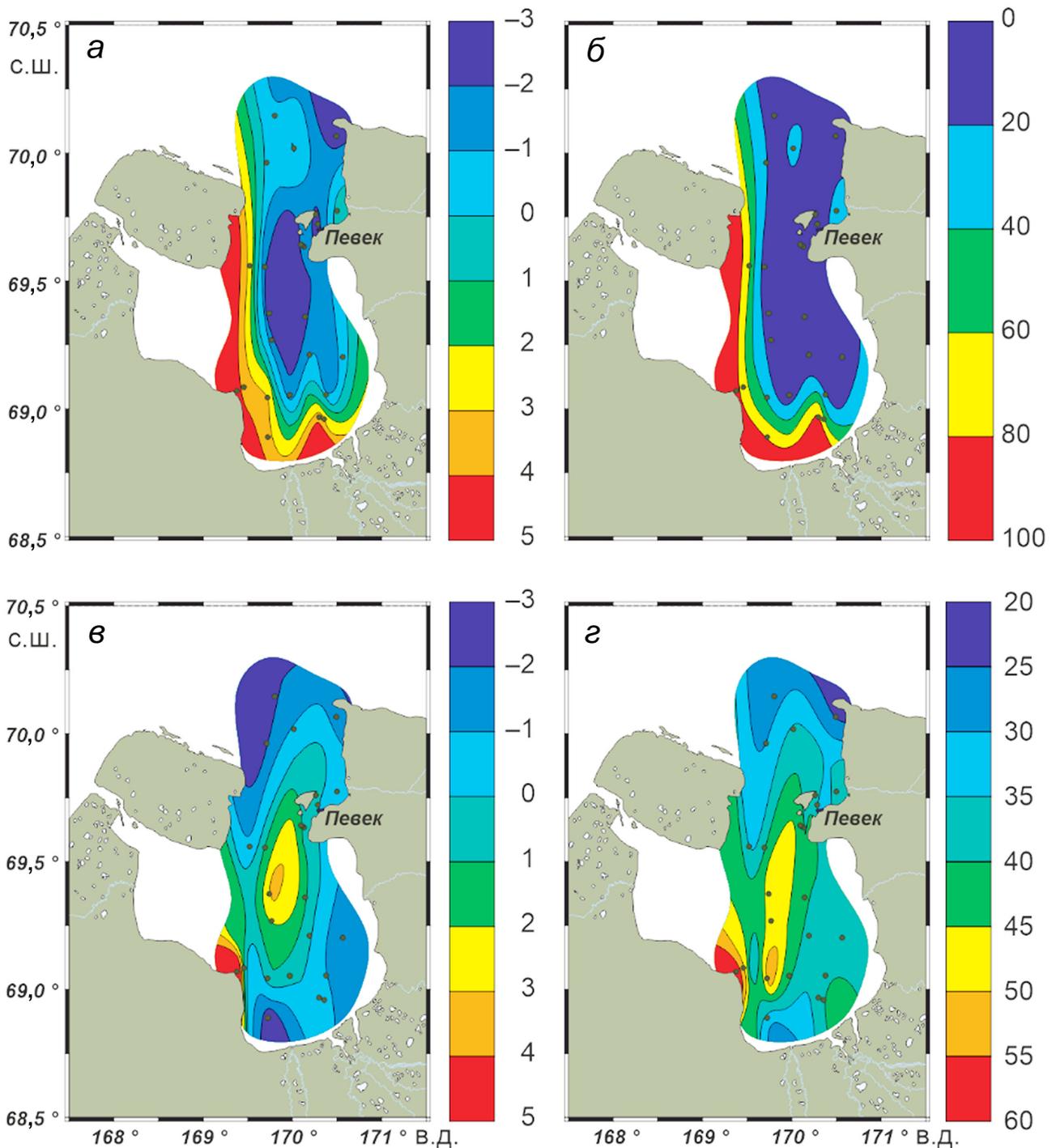


Рис. 4. Поверхностные распределения значений F1 (а), массового содержания фракции >63 мкм (б), F2 (в) и активной концентрации  $^{232}\text{Th}$  (г) в исследованных донных осадках

**Заключение.** Полученные в результате исследования данные позволили охарактеризовать пространственную изменчивость активности природных и антропогенных радионуклидов в поверхностных донных осадках Чаунской губы Восточно-Сибирского моря. Эта изменчивость сопряжена с гранулометрическим составом донных осадков и концентрацией ОВ и определяется региональными физико-географическими особенностями исследованной акватории и седиментационным режимом

отдельных районов губы. Результаты статистического анализа полученных данных показали, что динамика речного стока, термоабразии и течений, а также эолового и ледового переноса осадочного вещества, являются основными факторами, определяющими различия в поведении исследованных радионуклидов в поверхностных донных осадках Чаунской губы.

В результате исследования был выявлен рост активности природных радионуклидов с ростом

массовой доли песка в осадках, а также заметно повышенная активность радионуклидов  $^{40}\text{K}$ , что ранее не отмечалось для морских осадков морей Российской Арктики. По-видимому, это вызвано поступлением в осадки обломков пород, обогащенных  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{40}\text{K}$  (например, полевых шпатов, гранитоидов, сланцев). Различия в поведении природных радионуклидов в осадках могут быть также обусловлены обменом между водной толщей и минеральной матрицей [Webster, Hancock, 1995], приводящим к изменению соотношения  $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$ , что ранее было показано на примере подводной разгрузки грунтовых вод [Charkin et al., 2017, 2020].

Уровень радиоцеция показал отсутствие локальных источников антропогенного загрязнения в Чаунской губе, однако увеличение активности

$^{137}\text{Cs}$  и концентрации ОВ наблюдалось в осадках с повышенным содержанием пелитовой фракции. Выявленная корреляционная триада « $^{137}\text{Cs}$ -пелит- $\text{C}_{\text{орг}}$ » подтверждает активное взаимодействие радиоцеция с органическим веществом и глинистыми минералами [Budko et al., 2022; Koarashi et al., 2016; Basuki et al., 2018; Johnson-Pyrtle, Scott, 2001], которое может быть связано, например, с соосаждением радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  в комплексе с гуминовыми кислотами или глинистыми коллоидами [Shaban, Macásek, 1998].

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 19-77-10044). Финансирование экспедиции осуществлялось в рамках Государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0019).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доманов М.М., Амбросимов А.К., Новичкова Е.А. Особенности распределения  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в поверхностном слое морских осадков в условиях активной био-седиментации в зоне арктического фронта // Радиохимия. 2019. Т. 61, № 5. С. 446–449.
2. Доманов М.М., Верховская З.И., Амбросимов А.К., Доманова Е.Г. Сравнительная характеристика углеводородных структур и концентраций  $^{232}\text{Th}$  и  $^{226}\text{Ra}$  в осадках Каспийского моря // Нефтехимия. 2014. Т. 54, № 4. С. 275–282.
3. Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е. и др. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. 192 с.
4. Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Шахова Н.Е. и др. О механизмах деградации подводных многолетнемерзлых пород на восточном арктическом шельфе России // Докл. РАН. 2013. Т. 449, № 2. С. 185–188.
5. Мирошников А.Ю. Закономерности распределения радиоцеция в донных отложениях Карского моря // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 6. С. 540–550.
6. Мирошников А.Ю., Лаверов Н.П., Чернов Р.А. и др. Радиоэкологические исследования на севере архипелага Новая Земля // Океанология. 2017. Т. 57, № 1. С. 227–237.
7. Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Асадулин Э.Э., Комаров В.Б. Радиационно-геохимическая устойчивость донных осадков в эстуариях Оби и Енисея и на прилегающем мелководье Карского моря // Океанология. 2020. Т. 60, № 6. С. 930–944.
8. Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Асадулин Э.Э. и др. Экологическое состояние и минералого-геохимические характеристики донных осадков Восточно-Сибирского моря // Океанология. 2020. Т. 60, № 4. С. 595–610.
9. Саркисов А.А. К вопросу о ликвидации радиоактивных загрязнений в Арктическом регионе // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 2. С. 107–124.
10. Стремяков А.Я. К вопросу о происхождении ориентированных озер // Многолетнемерзлые горные породы различных районов СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 75–107.
11. Ульяновцев А.С., Братская С.Ю., Привар Ю.О. Гранулометрические характеристики донных отложений губы Буор-Хая // Океанология. 2020. Т. 60, № 3. С. 452–465.
12. Ульяновцев А.С., Чаркин А.Н., Семин В.Л. и др. Геологические исследования верхней осадочной толщи Чаунской губы в 60-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Опарин» // Океанология. 2021. Т. 61, № 4. С. 666–668.
13. Экосистемы, флора и фауна Чаунской губы Восточно-Сибирского моря / Под ред. А.О. Скарлато. Серия «Исследования фауны морей». Вып. 47 (55). СПб.: ЗИН РАН, 1994. 267 с.
14. Abbasi A. Cs distribution in the South Caspian region, transfer to biota and dose rate assessment // Int. J. Environ. Anal. Chem. 2019. Vol. 100. P. 576–590.
15. Abbasi A., Zakaly H.M.H., Algethami M., Abdel-Hafez S.H. Radiological risk assessment of natural radionuclides in the marine ecosystem of the northwest Mediterranean Sea // Int. J. Radiat. Biol. 2022. Vol. 98. P. 205–211.
16. Abbasi A., Zakaly H.M.H., Mirekhtiary F. Baseline levels of natural radionuclides concentration in sediments East coastline of North Cyprus // Mar. Pollut. Bull. 2020. Vol. 161. P. 111793.
17. Abril J.M., Fraga E. Some Physical and Chemical Features of the Variability of Kd Distribution Coefficients for Radionuclides // J. Environ. Radioact. 1996. Vol. 30. P. 253–270.
18. Alshahri F. Radioactivity of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in beach sand and sediment near to desalination plant in eastern Saudi Arabia: Assessment of radiological impacts // J. King Saud Univ. — Sci. 2017. Vol. 29. P. 174–181.
19. Basuki T., Miyashita S., Tsujimoto M., Nakashima S. Deposition Density of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  and Particle Size Distribution of Soil and Sediment Profile in Hibara Lake Area, Fukushima: An Investigation of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Indirect Deposition into Lake from Surrounding Area // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2018. Vol. 316. P. 1039–1046.
20. Bröder L., Andersson A., Tesi T., et al. Quantifying Degradative Loss of Terrigenous Organic Carbon in Surface Sediments Across the Laptev and East Siberian Sea // Global Biogeochem Cycles. 2019. Vol. 33(1). P. 85–99.
21. Budko D.F., Demina L.L., Travkina A. V., et al. Heavy Metals and Cs-137, in Surface Sediments of the Barents, Kara, Laptev and East Siberian Seas // Minerals. 2022. Vol. 12. P. 328.
22. Charkin A.N., Pipko I.I., Pavlova Yu.G., et al. Hydrochemistry and isotopic signatures of subpermafrost ground-

water discharge along the eastern slope of the Lena River Delta in the Laptev Sea // *J. Hydrol.* 2020. Vol. 590. P. 125515.

23. *Charkin A.N., Van Der Loeff M.R., Shakhova N.E., et al.* Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: A case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea // *Cryosphere.* 2017. Vol. 11. P. 2305–2327.

24. *Charkin A.N., Yaroshchuk E.I., Dudarev O. V., et al.* The Influence of Sedimentation Regime on Natural Radionuclide Activity Concentration in Marine Sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *J. Environ. Radioact.* 2022. Vol. 253–254. P. 106988.

25. *Günther F., Overduin P.P., Yakshina I.A., et al.* Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to arctic summer warming and sea ice reduction // *The Cryosphere.* 2015. Vol. 9. P. 151–178.

26. *Johnson-Pyrtle A., Scott M.R.* Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in the Lena River Estuary-Laptev Sea System // *Mar. Pollut. Bull.* 2001. Vol. 42. P. 912–926.

27. *Koarashi J., Nishimura S., Nakanishi T., et al.* Post-Deposition Early-Phase Migration and Retention Behavior of Radiocesium in a Litter–Mineral Soil System in a Japanese Deciduous Forest Affected by the Fukushima Nuclear Accident // *Chemosphere.* 2016. Vol. 165. P. 335–341.

28. *Ligero R.A., Ramos-Lerate I., Barrera M., Casas-Ruiz M.* Relationships between Sea-Bed Radionuclide Activities and Some Sedimentological Variables // *J. Environ. Radioact.* 2001. Vol. 57. P. 7–19.

29. *Mehnati P., Jomehzadeh A., Doostmohammadi V.* Measurement of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in sediment samples and determination of annual effective dose due to these radionuclides in vicinity of hot springs in Kerman Province // *Int. J. Radiat. Res.* 2022. Vol. 20. P. 223–228.

30. *Nguyen T.N., Tran Q.T., Nguyen Van Phuc, et al.* Activity Concentrations of Sr-90 and Cs-137 in Seawater and

Sediment in the Gulf of Tonkin, Vietnam // *J. Chem.* 2020. P. 8752606.

31. *Overduin P. P., Strzelecki M. C., Grigoriev M. N., et al.* Coastal changes in the Arctic // *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences / Eds. Martini I.P., Wanless, H.R.* Geological Society of London Special Publication, 2014. Vol. 388. P. 103–129.

32. *Schirrmeister L., Grosse G., Schwamborn G., et al.* // Late Quaternary History of the Accumulation Plain North of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): A Multi-disciplinary Approach // *Polar Geography.* 2003. Vol. 27(4). P. 277–319.

33. *Shaban I.S., Macásek F.* Influence of humic substances on sorption of cesium and strontium on montmorillonite // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 1998. Vol. 229. P. 73–78.

34. *Shakhova, N., Semiletov, I., Gustafsson, O., et al.* Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Communications.* 2017. Vol. 8. P. 15872.

35. *Strauss J., Schirrmeister L., Wetterich S., et al.* Grain-size properties and organic-carbon stock of Yedoma Ice Complex permafrost from the Kolyma lowland, northeastern Siberia // *Global Biogeochem. Cycl.* 2012. Vol. 26. GB3003.

36. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. 1. United Nation: New York, NY, USA, 2000. 654 p.

37. *Vonk J.E., Sanchez-Garcia L., van Dongen B.E., et al.* Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia // *Nature.* 2012. Vol. 489. P. 137–140.

38. *Webster I.T., Hancock G.J., Murray A.S.* Modelling the effect of salinity on radium desorption from sediments // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. Vol. 59. P. 2469–2476.

39. *Yushin N., Jakhu R., Chaligava O., et al.* Natural and anthropogenic radionuclides concentration with heavy metals analysis of the sediments collected around Novaya Zemlya // *Mar. Pollut. Bull.* 2023. Vol. 194. 115346.

Статья поступила в редакцию 20.09.2023,  
одобрена после рецензирования 02.10.2023,  
принята к публикации 22.01.2024