

## Факторы формирования пространственного распределения природных и техногенных радионуклидов в донных отложениях Камышовой бухты, Севастополь

Д. А. Кременчуцкий ✉, Ю. С. Гурова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
✉ d.kremenchutskii@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 22.01.2023; одобрена после рецензирования 18.02.2023;  
принята к публикации 05.07.2023.

### Аннотация

**Цель.** Цель статьи – выявить особенности пространственного распределения содержания радионуклидов ( $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$ ) в донных осадках Камышовой бухты и выделить факторы, определяющие эти особенности.

**Методы и результаты.** В работе представлены результаты измерений концентрации  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  в девяти пробах поверхностного (0–5 см) слоя и двух колонках донных отложений, отобранных в Камышовой бухте в июле 2021 г. Активность  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  в пробах определялась на низкофономом гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором  $\text{NaI}(\text{TI})$  колодезного типа. Приведены оценки взаимосвязи активности рассматриваемых радионуклидов в донных осадках с гранулометрическим составом осадка и с содержанием органического углерода. Получены количественные оценки скорости седиментации, потока вещества и радионуклидов в донные осадки.

**Выводы.** В пространственной изменчивости концентраций рассматриваемых радионуклидов отмечается общая тенденция к увеличению значений от северной части бухты к южной. Результаты анализа указывают на то, что пространственная изменчивость содержания радионуклидов в поверхностных пробах донных отложений и их вертикальное распределение в двух колонках объясняется изменением в гранулометрическом составе и скоростях осадконакопления, а также наличием источников ливневых и бытовых сточных вод в южной части бухты. На основе результатов корреляционного анализа сделано предположение, что в исследуемом районе происходит процесс очистки вод в результате адсорбции радионуклидов и органического вещества мелкозернистым материалом с последующей седиментацией этого материала в донные отложения. Усредненные значения скорости осадконакопления и потока вещества в донные отложения составили 0,43 см/год и 2976 г/(м<sup>2</sup>·год) соответственно. Поток радионуклидов в донные отложения составил 53,0 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{137}\text{Cs}$ , 690,5 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{40}\text{K}$ , 58,0 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{226}\text{Ra}$  и 79,5 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ .

**Ключевые слова:** Черное море, Камышова бухта, донные отложения, гранулометрический состав, органический углерод, цезий-137,  $^{137}\text{Cs}$ , калий-40,  $^{40}\text{K}$ , радий-226,  $^{226}\text{Ra}$ , свинец-210,  $^{210}\text{Pb}$ , скорость осадконакопления, радионуклиды, седиментация

**Благодарности:** пробы донных отложений и данные об их геохимических характеристиках были получены в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2021-0005. Данные об активности радионуклидов были получены в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2021-0004. Количественные оценки скорости осадконакопления и потоков веществ в донные осадки получены в рамках проекта РНФ № 22-77-10056.

Для цитирования: Кременчуцкий Д. А., Гурова Ю. С. Факторы формирования пространственного распределения природных и техногенных радионуклидов в донных отложениях Камышовый бухты, Севастополь // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 692–707. EDN FYRBGS.

Original article

## Factors Forming the Spatial Distribution of Natural and Man-Made Radionuclides in the Bottom Sediments of the Kamyshovaya Bay, Sevastopol

D. A. Kremenchutskii ✉, Yu. S. Gurova

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ d.kremenchutskii@mhi-ras.ru

### Abstract

**Purpose.** The purpose of the article is to reveal the features of spatial distribution of the radionuclide ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$ ) contents in the bottom sediments of the Kamyshovaya Bay and to identify the factors determining them.

**Methods and Results.** The paper presents the results of measurements of the concentrations of  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  in nine samples of the surface (0–5 cm) layer and in two cores of bottom sediments collected in the Kamyshovaya Bay in July 2021. The activity of  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  in the samples was determined using a low-background gamma spectrometer with a well-type  $\text{NaI}(\text{Tl})$  scintillation detector. Estimates of the relationship between the activity of the radionuclides under consideration in the bottom sediments with the sediment granulometric composition and the organic carbon content are given. The rate of sedimentation and the flux of matter and radionuclides to the bottom sediments were quantitatively assessed.

**Conclusions.** Spatial variability of the concentrations of radionuclides under consideration reveals a general tendency towards increase of their values from the northern part of the bay to its southern one. The results of the analysis indicate that the spatial variability of radionuclide content in the surface sediment samples and their vertical distribution in the two columns are explained by the changes in particle size distribution and in sedimentation rates, as well as by presence of the storm water and domestic wastewater sources in the bay southern part. Based on the results of the correlation analysis, the process of water purification in the area under study was assumed to result from the adsorption of radionuclides and organic matter by a fine-grained material that was followed by sedimentation of this material in bottom sediments. The average values of the sedimentation rate and the matter flux to bottom sediments were 0.43 cm/year and 2976 g/(m<sup>2</sup>·year), respectively. The flux of radionuclides to the bottom sediments was 53.0 Bq/(m<sup>2</sup>·year) for  $^{137}\text{Cs}$ , 690.5 Bq/(m<sup>2</sup>·year) for  $^{40}\text{K}$ , 58.0 Bq/(m<sup>2</sup>·year) for  $^{226}\text{Ra}$  and 79.5 Bq/(m<sup>2</sup>·year) for  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ .

**Keywords:** Black Sea, Kamyshovaya Bay, bottom sediments, particle size distribution, organic carbon, cesium-137,  $^{137}\text{Cs}$ , potassium-40,  $^{40}\text{K}$ , radium-226,  $^{226}\text{Ra}$ , lead-210,  $^{210}\text{Pb}$ , sedimentation rate, radionuclides, sedimentation

**Acknowledgments:** The bottom sediment samples and the data on their geochemical characteristics were obtained within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI No. FN NN-2021-0005. The data on radionuclide activity were obtained within the framework of the theme of state assignment of FSBSI FRC MHI No. FN NN-2021-0004. Quantitative estimates of the sedimentation rate and substance fluxes to the bottom sediments were obtained within the framework of the RSF project No. 22-77-10056.

**For citation:** Kremenchutskii, D.A. and Gurova, Yu.S., 2023. Factors Forming the Spatial Distribution of Natural and Man-Made Radionuclides in the Bottom Sediments of the Kamyshovaya Bay, Sevastopol. *Physical Oceanography*, 30(5), pp. 652-665.

## Введение

Прибрежные акватории подвержены значительной антропогенной нагрузке, изменяющей скорость протекания геохимических процессов и приводящей к загрязнению донных отложений. Изучением донных отложений Камышовой бухты на протяжении многих лет занимаются сотрудники Института биологии южных морей РАН (ИнБЮМ, Севастополь). В работах [1–4] выделены основные физические характеристики осадка (натуральная влажность, величины Eh и pH), а также оценки загрязнения поверхностного слоя донных отложений хлороформ-экстрагируемыми веществами и нефтяными углеводородами [2–4]. Отмечено, что большая часть отложений бухты характеризуется окислительными условиями, сменяющимися на восстановленные (Eh до  $-59$  мВ [2] и  $-94$  мВ [4]) в илистых отложениях центральной части. В работе [3] отмечено, что проведение дноуглубительных работ в бухте ранее уже отражалось на темпах загрязнения отложений бухты.

В работе [5] установлено, что химия поровых вод донных отложений бухты определяется процессами с участием растворенных форм железа (Fe (II, III)) и сероводорода. Показано, что наличие субкислородных условий в верхнем слое отложений указывает на формирование зон экологического риска для экосистемы бухты [5].

Радионуклиды традиционно представляют интерес как в качестве самостоятельного объекта для исследований, поскольку в высоких концентрациях они оказывают негативное влияние на экосистему, так и в роли трассеров процессов, определяющих поступление веществ в морскую среду и их накопление в донных осадках [6–21].

Цезий-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) – это радионуклид техногенного происхождения с периодом полураспада ( $T_{1/2}$ ) 30,05 лет. Источниками этого радионуклида в Черноморском регионе выступают его потоки из атмосферы и с речным стоком [6]. Последнее масштабное поступление этого радионуклида в регионе было следствием аварии на Чернобыльской АЭС. Исследованию содержания этого радионуклида в донных отложениях Черного моря посвящено большое количество работ [6–13]. Одна из причин такого большого научного интереса к этому радионуклиду заключается в том, что данные о его вертикальном распределении в донных отложениях могут быть использованы для оценки скорости осадконакопления [12, 14–15].

Калий-40 ( $^{40}\text{K}$ ), радий-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) и свинец-210 ( $^{210}\text{Pb}$ ) – это радионуклиды природного происхождения ( $T_{1/2}$  равен  $1,25 \cdot 10^9$ ,  $1,6 \cdot 10^3$  и 22,2 года соответственно). В донные осадки они попадают с речным стоком, в составе атмосферных осадков, с эоловым материалом, за счет абразии берегов и из вулканических источников<sup>1</sup>.  $^{40}\text{K}$  и  $^{210}\text{Pb}$  могут дополнительно поступать с оседающим органическим веществом. Почти десятикратное различие в содержании  $^{40}\text{K}$  в биогенном и литогенном веществах делают этот радионуклид потенциально полезным трассером для оценки доли биогенного вещества в донных отложениях [12, 16, 17]. Пара радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{210}\text{Pb}$  широко используется для получения количественных оценок скорости осадконакопления [18–21].

---

<sup>1</sup> Батурин Г. Н. Уран в современном морском осадкообразовании. М. : Атомиздат, 1975. С. 4.  
694 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 39 № 5 2023

Для проведения таких оценок используются данные об «избыточной» активности  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  в донных осадках, вычисляемой как разница между активностью  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{226}\text{Ra}$ . Эта «избыточная» активность возникает вследствие адсорбции  $^{210}\text{Pb}$  на частицах атмосферного аэрозоля и морской взвеси на протяжении всего пути, пока эти частицы не стали частью донных отложений.

В работах [6, 9, 12, 16, 19] приводится информация о содержании радионуклидов в донных осадках бухт Севастопольского региона и основное внимание уделяется использованию радионуклидов для оценки скоростей осадконакопления. При этом исследования взаимосвязи содержания радионуклидов с геохимическими характеристиками осадков не проводились. Кроме того, ранние исследования не охватывали акваторию Камышовой бухты.

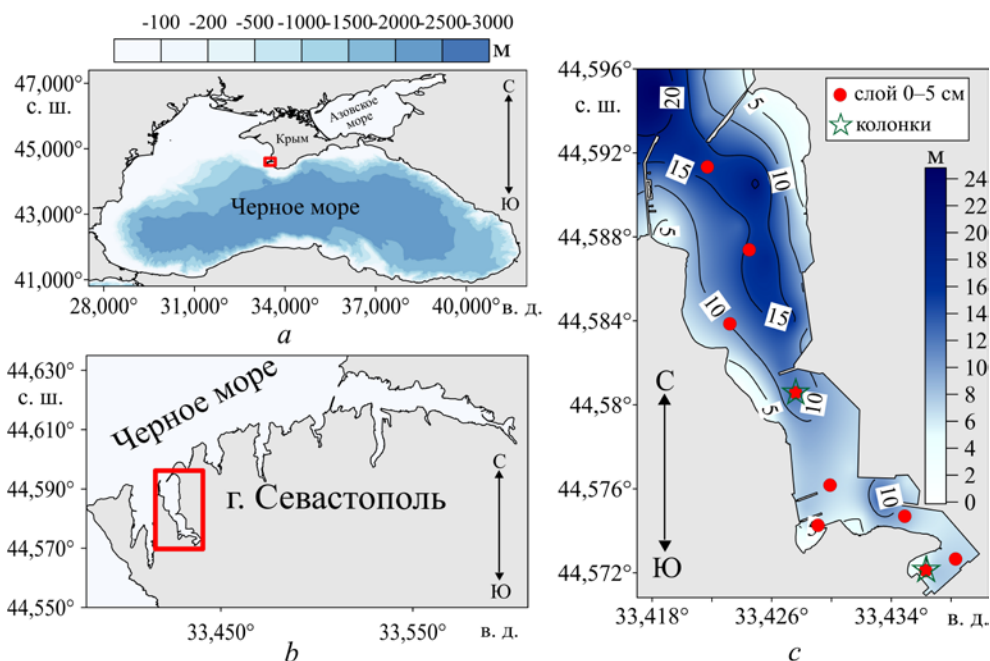
Цель работы – выявить особенности пространственного распределения содержания радионуклидов ( $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$ ) в донных осадках Камышовой бухты и выделить факторы, определяющие эти особенности.

### Материалы и методы

*Район исследований.* Камышова бухта расположена в западной части Гераклеийского п-ова и является характерным примером полузамкнутой акватории, подверженной длительному антропогенному воздействию. Основные источники антропогенной нагрузки на экосистему бухты: деятельность Севастопольского морского рыбного порта, действующий нефтяной терминал, цементный завод, возведение объектов капитального строительства на западном берегу, стоки ливневых и канализационных вод [1, 2]. Береговая линия бухты существенно изрезана и осложнена большим количеством пирсов и стоянок судов. Кроме того, существенное влияние на состояние бухты оказывает заградительный мол, препятствующий водообмену между бухтой и открытым морем. Все эти факторы обуславливают пространственную изменчивость геохимических характеристик донных отложений. Так, в верховье бухты осадки представлены ракушечным гравием и песком с низким содержанием органического углерода (0,3 %), а в центральной и южной частях – алевритовыми и пелитовыми илами с повышенным содержанием органического углерода (2,2 %) [5].

*Методы отбора и обработки проб.* Отбор и подготовка проб донных осадков выполнялись в соответствии с нормативными документами (ГОСТ 17.1.5.01-80; ISO 5667-19:2004).

Отбор проб донных осадков был выполнен в июле 2021 г. (рис. 1). Пробы поверхностного слоя донных осадков (0–5 см) отбирались с помощью дночерпателя Петерсена (девять проб). Отбор проб колонок производился с помощью ручного проботорника и акриловой грунтовой трубки с внутренним диаметром 60 мм и вакуумным затвором (две пробы). На борту колонки закрывали снизу пробкой и транспортировали в лабораторию. В лаборатории колонки разделяли на слои толщиной 2 см с помощью ручного экструдера и кольца из акрила. Далее пробоподготовка выполнялась согласно нормативным документам для других анализов.



**Р и с. 1.** Расположение исследуемого района (а), увеличенное изображение выделенного на рис. 1, а красным прямоугольником Севастопольского региона (б), схема станций отбора проб донных отложений в Камышовой бухте, обозначенной на рис. 1, б красным прямоугольником (с) **F i g. 1.** Location of the area under study (а), enlarged image of the Sevastopol region highlighted with a red rectangle in Fig. 1, а (б), scheme of the bottom sediment sampling stations in the Kamyshevaya Bay indicated with a red rectangle in Fig. 1, б (с)

Гранулометрический состав донных отложений определяли по массовому содержанию частиц различной крупности, выраженному в процентах, по отношению к массе сухой пробы грунта, взятой для анализа. При этом применялся комбинированный метод декантации и рассеивания. Отделение алеврито-пелитовой фракции ( $\leq 0,05$  мм) выполнялось мокрым просеиванием с последующим определением сухой массы гравиметрически. Крупнозернистые фракции ( $> 0,05$  мм) разделялись ситовым методом сухого просеивания с использованием стандартных сит (ГОСТ 12536-2014).

Пробы донных осадков упаковывались в пластиковые пробирки объемом 50 мл. Объем единичной пробы составлял 30 мл. Каждая проба герметизировалась воском и выдерживалась не менее 24 сут перед проведением измерения активности радионуклидов в ней. За это время наступает равновесие между активностью  $^{226}\text{Ra}$  и его дочерними продуктами распада  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$ , по которым и проводилось определение активности  $^{226}\text{Ra}$  в пробе. Измерения активности радионуклидов ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$ ) в пробах донных осадков проводились на низкофоновом гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором  $\text{NaI(Tl)}$  колодезного типа. Диаметр кристалла составляет 100 мм, его высота – 100 мм. Диаметр колодца 30 мм, его глубина – 60 мм. Разрешение 7 % по линии  $^{137}\text{Cs}$  с энергией 661 кэВ. Сцинтиблок располагался в четы-

рехслойной защите, внешний слой которой образован кирпичами низкофонового свинца (14 см), далее слой из чугунных колец (15 см), слой меди (3 мм) и слой оргстекла (1 см). Время измерения единичной пробы определялось исходя из активности радионуклидов в ней и изменялось от 24 до 48 ч.

Калибровка эффективности регистрации гамма-квантов с различной энергией была выполнена с использованием сертифицированных источников, поставляемых МАГАТЭ (IAEA-326, IAEA-CU-2006-03) и имевших форму и размеры, аналогичные исследованным нами образцам.

Концентрация отдельно взятого радионуклида ( $C$ ) в пробе донных осадков рассчитывалась по следующей формуле [22]:

$$C = \frac{N}{t \cdot m \cdot \varepsilon(E) \cdot \gamma(E) \cdot \exp(-\lambda \Delta t)},$$

где  $C$  – концентрация радионуклида, Бк/кг;  $N$  – площадь фотопика радионуклида в импульсах;  $t$  – время набора спектра, с;  $m$  – масса пробы в кг;  $\varepsilon(E)$  – эффективность регистрации гамма-квантов с энергией  $E$ ;  $\gamma(E)$  – выход гамма-квантов с энергией  $E$  при распаде соответствующего радионуклида; где  $\lambda$  – постоянная распада, равная для  $^{137}\text{Cs}$   $9,11 \cdot 10^{-5}$  1/сут, для  $^{40}\text{K}$   $2,28 \cdot 10^{-12}$  1/сут, для  $^{210}\text{Pb}$   $1,23 \cdot 10^{-4}$  1/сут, для  $^{226}\text{Ra}$   $1,71 \cdot 10^{-6}$  1/сут;  $\Delta t$  – промежуток времени между отбором пробы и началом регистрации ее активности, сут.

Оценки скорости осадконакопления были получены с использованием модели постоянного потока и скорости седиментации [18, 23]

$$A_z = A_0 \cdot e^{-(\lambda z/SR)},$$

где  $A_z$  – концентрация избыточного  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  в слое  $z$ , Бк/кг;  $z$  – глубина слоя донных осадков, см;  $A_0$  – концентрация избыточного  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  в поверхностном слое осадка, Бк/кг;  $SR$  – скорость осадконакопления, см/год.

Поток вещества в донные осадки ( $MAR$ ) рассчитывался по следующей формуле:

$$MAR = \frac{m \cdot SR}{V},$$

где  $m$  – общая масса сухого вещества в колонке донных осадков, г;  $SR$  – осредненная скорость седиментации, м/год;  $V$  – объем колонки донных осадков, м<sup>3</sup>.

Нижний предел обнаружения, рассчитываемый согласно [24], для  $^{137}\text{Cs}$  составил 0,13 Бк на пробу, для  $^{40}\text{K}$  – 3,4 Бк на пробу, для  $^{210}\text{Pb}$  – 1,3 Бк на пробу и для  $^{226}\text{Ra}$  – 0,23 Бк на пробу. Погрешность расчета содержания радионуклидов в пробах ( $1\sigma$ ) в большинстве случаев не превышала 20 %.

Значения содержания органического углерода в пробах донных отложений были взяты из работы [5].

Данные, используемые в настоящем исследовании, представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Table 1

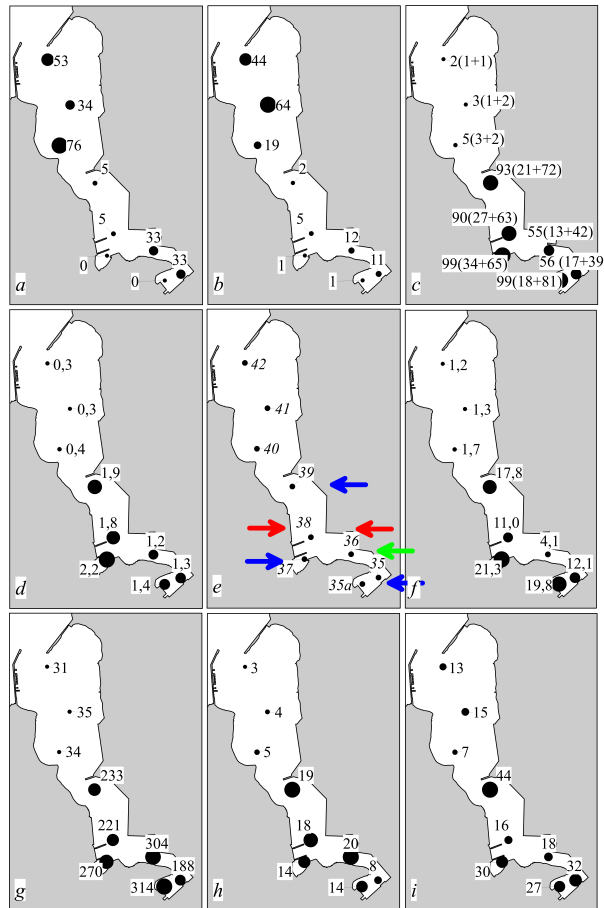
Количественные характеристики исследуемых параметров  
Quantitative characteristics of the studied parameters

№ станции / Station No.	Слой / Layer	Концентрация в донных осадках, Бк/кг / Concentration in bottom sediments, Bq/kg				Содержание $C_{org}$ , % / Content of $C_{org}$ , %	Доля фракции в донных осадках, % / Share of fraction in bottom sediments, %				
		$^{137}Cs$	$^{40}K$	$^{226}Ra$	$^{210}Pb_{inst}$		гравийной / gravel	песчаной / sand	илистой / silt	алевритовой / aleurite-pelitic	пелитовой / pelite-aleuritic
35	0-5	12,1 ± 1,2	188,4 ± 20,6	8,3 ± 0,9	32,1 ± 5,9	12	32,8	11,0	56,2	17,0	39,2
35a	0-5	19,8 ± 1,0	313,8 ± 17,5	13,6 ± 0,8	27,3 ± 4,1	1,33	0,0	1,3	98,7	18,1	80,6
-	0-2	16,5 ± 1,6	343,6 ± 33,1	16,1 ± 1,6	30,7 ± 5,6	1,38	0,9	5,5	93,8	20,3	73,5
-	2-4	15,4 ± 1,4	221,9 ± 22,4	13,4 ± 1,3	9,4 ± 2,0	1,62	17,2	16,0	66,9	17,4	49,5
-	4-6	16,1 ± 1,4	294,1 ± 25,9	13,9 ± 1,3	13,4 ± 2,3	1,13	23,3	11,0	65,7	15,3	50,5
-	6-8	16,5 ± 1,4	272,2 ± 25,3	15,9 ± 1,5	16,0 ± 2,8	1,26	4,4	11,6	84,0	18,4	65,6
-	8-10	10,1 ± 1,0	258,2 ± 24,1	14,4 ± 1,3	6,0 ± 1,2	1,13	24,3	11,4	64,2	16,2	48,1
-	10-12	5,1 ± 0,5	281,7 ± 25,6	14,6 ± 1,3	2,9 ± 0,6	0,75	28,1	15,1	56,9	16,8	40,1
-	12-14	16,1 ± 1,4	295,0 ± 27,3	15,0 ± 1,4	11,6 ± 2,2	1,04	4,8	6,7	88,5	20,4	68,2
-	14-16	22,0 ± 1,9	342,8 ± 32,4	15,7 ± 1,5	25,1 ± 4,5	1,30	0,3	2,1	97,7	22,0	75,7
-	16-18	18,9 ± 1,8	305,2 ± 30,0	18,4 ± 1,7	41,3 ± 6,7	1,49	0,0	2,5	97,5	18,3	79,1
36	0-5	4,1 ± 0,4	303,9 ± 27,0	19,7 ± 1,7	18,1 ± 2,8	1,46	33,0	12,1	55,0	13,0	42,0
37	0-5	21,3 ± 1,9	269,9 ± 27,2	14,5 ± 1,5	29,9 ± 5,3	1,23	0,0	1,1	98,9	33,7	65,2
38	0-5	11,0 ± 1,1	221,3 ± 23,7	17,5 ± 1,7	16,1 ± 3,2	2,21	5,0	5,1	89,9	27,0	63,0
39	0-5	17,8 ± 1,8	232,6 ± 23,7	19,5 ± 1,8	44,1 ± 4,4	1,81	5,1	2,3	92,6	20,7	71,9
-	0-2	21,9 ± 2,0	232,8 ± 25,4	22,0 ± 2,1	44,7 ± 7,3	1,94	5,5	2,5	92,0	25,1	67,0
-	2-4	18,3 ± 1,7	206,8 ± 22,8	20,1 ± 1,9	45,4 ± 7,2	1,75	0,0	1,5	98,5	23,3	75,2
-	4-6	19,5 ± 2,0	203,4 ± 21,3	19,3 ± 1,8	40,4 ± 6,1	1,76	1,5	4,2	94,3	21,1	73,3
-	6-8	17,1 ± 1,5	195,0 ± 19,9	19,6 ± 1,8	30,5 ± 4,7	1,66	3,7	4,5	91,8	24,4	67,4
-	8-10	17,9 ± 1,6	167,7 ± 18,5	15,8 ± 1,5	33,1 ± 5,3	1,82	8,4	12,8	78,8	23,5	55,3
-	10-12	13,3 ± 1,3	210,0 ± 22,0	15,3 ± 1,5	20,8 ± 3,8	1,2	8,7	10,1	81,3	17,4	63,9
-	12-14	11,2 ± 1,2	183,9 ± 25,5	18,8 ± 2,1	23,2 ± 5,5	1,81	13,9	6,2	79,9	16,2	63,7
40	0-5	1,7 ± 0,3	33,6 ± 6,6	5,3 ± 0,7	6,6 ± 1,7	2,18	75,8	19,3	4,9	3,1	1,8
41	0-5	1,3 ± 0,3	34,8 ± 6,4	4,4 ± 0,6	15,0 ± 3,1	0,38	33,8	63,6	2,7	1,2	1,4
42	0-5	1,2 ± 0,2	30,9 ± 6,6	3,3 ± 0,5	12,6 ± 3,1	0,32	53,4	44,2	2,5	1,3	1,1

## Результаты и обсуждение

### Изменчивость характеристик поверхностного слоя донных осадков

Концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в донных осадках изменялась от 1,2 до 21,3 Бк/кг, среднее значение –  $10,0 \pm 0,9$  Бк/кг ( $n = 9$ ). Концентрация  $^{40}\text{K}$  изменялась от 30,9 до 313,8 Бк/кг со средним значением  $181 \pm 17,7$  Бк/кг ( $n = 9$ ). Концентрация  $^{226}\text{Ra}$  варьировалась от 3,3 до 19,7 Бк/кг (среднее значение  $11,8 \pm 1,1$  Бк/кг ( $n = 9$ )). Концентрация  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  лежала в диапазоне от 6,6 до 32,1 Бк/кг со средним значением  $20,5 \pm 3,7$  Бк/кг ( $n = 9$ ). В пространственной изменчивости концентраций рассматриваемых радионуклидов отмечается общая тенденция к увеличению значений от северной части бухты к южной (рис. 2,  $f - i$ ).



**Рис. 2.** Пространственная изменчивость в слое донных осадков 0–5 см гравийной (*a*), песчаной (*b*), илистой (алеврито-пелитовой и пелито-алевритовой) (*c*) долей фракции в донных осадках, %, содержания  $C_{\text{орг}}$ , %, (*d*), источников стоков (*e*), содержания  $^{137}\text{Cs}$  (*f*),  $^{40}\text{K}$  (*g*),  $^{226}\text{Ra}$  (*h*) и  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ , Бк/кг (*i*). Положение ливневых (синие стрелки), аварийного (зеленая стрелка) и бытовых (красные стрелки) стоков согласно [25]

**Fig. 2.** Spatial variability of the gravel (*a*), sand (*b*) and silt (aleurite-pelitic and pelite-aleuritic) (*c*) shares of a fraction, %,  $C_{\text{org}}$  content, %, (*d*), wastewater sources (*e*) and the  $^{137}\text{Cs}$  (*f*),  $^{40}\text{K}$  (*g*),  $^{226}\text{Ra}$  (*h*) and  $^{210}\text{Pb}_{\text{un}}$  contents, Bq/kg, (*i*) in the 0–5 cm layer of bottom sediments. Position of the storm (blue arrows), emergency (green arrow) and domestic waste water (red arrows) drains according to [25]



Полученные значения концентрации радионуклидов в пробах донных осадков согласуются с литературными данными. Так, по данным работ [19, 22], концентрации  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  в донных осадках Балаклавской бухты изменялись в диапазонах 11–62 Бк/кг, 155–562 Бк/кг, 8–42 Бк/кг и 41–48 Бк/кг соответственно. По данным работ [17, 26], концентрация  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  в донных осадках Севастопольской бухты варьировалась в интервалах 68–142 Бк/кг и 276–687 Бк/кг соответственно.

Результаты корреляционного анализа (табл. 2) указывают на сильную, статистически значимую на уровне достоверности 95 % взаимосвязь активности рассматриваемых радионуклидов в донных осадках и геохимических характеристик последних: положение районов с повышенной активностью радионуклидов совпадает с участками, характеризующимися повышенной долей илистой фракции, в частности пелито-алевритовой ее части (рис. 2, с). В центральной части бухты (ст. 37–39) ввиду ее замкнутости, большого количества поступающих источников коммунальных и ливневых стоков (рис. 2, е), а также плотного расположения стоянок судов доля илистой фракции максимальна. Отложения здесь состоят в среднем на 94 % из мелкозернистого материала. Минимальное содержание мелкозернистого материала отмечается в верховье бухты у западного берега (ст. 40–42) и в южной части бухты (ст. 35, 36), что обусловлено наличием открытых береговых клифов и поступлением гравийно-песчаного материала в результате береговой абразии [5]. Так, для поверхностного слоя донных осадков рост доли пелито-алевритовой фракции с 1 до 81 % (т. е. в 81 раз) сопровождается увеличением активности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  примерно в 16, 10, 4 и 2 раза соответственно. Этот результат согласуется с выводами, сделанными в ранних исследованиях [27–29]: более мелкие частицы взвеси характеризуются большой удельной поверхностью и эффективней удаляют различные вещества из морской среды в донные осадки.

Т а б л и ц а 2  
Table 2

**Коэффициенты корреляции Пирсона между исследуемыми параметрами в поверхностном слое донных отложений**  
**Pearson correlation coefficients between the studied parameters in the upper layer of bottom sediments**

Радионуклид / Radio-nuclide	Доля фракции в донных осадках, % / Share of fraction in bottom sediments, %					Содержание Сорг. % / Content of Сорг. %
	гравийной / gravel	песчаной / sand	илистой / silt	алеврито- пелитовой / aleurite-pelitic	пелито- алевритовой / pelite-aleuritic	
$^{137}\text{Cs}$	-0,85 <sup>‡</sup>	-0,77 <sup>†</sup>	0,92 <sup>‡</sup>	0,86 <sup>‡</sup>	0,91 <sup>‡</sup>	0,87 <sup>‡</sup>
$^{40}\text{K}$	-0,78 <sup>†</sup>	-0,81 <sup>‡</sup>	0,90 <sup>‡</sup>	0,78 <sup>†</sup>	0,91 <sup>‡</sup>	0,82 <sup>‡</sup>
$^{226}\text{Ra}$	-0,70 <sup>†</sup>	-0,75 <sup>†</sup>	0,82 <sup>‡</sup>	0,72 <sup>†</sup>	0,83 <sup>‡</sup>	0,82 <sup>‡</sup>
$^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$	-0,72 <sup>†</sup>	-0,55	0,74 <sup>†</sup>	0,69 <sup>†</sup>	0,73 <sup>†</sup>	0,73 <sup>†</sup>

<sup>‡</sup> Коэффициент корреляции статистически значим на уровне достоверности 99 % ( $p < 0,01$ ) / Correlation coefficient is statistically significant at the 99% confidence level ( $p < 0.01$ ).

<sup>†</sup> Коэффициент корреляции статистически значим на уровне достоверности 95 % ( $p < 0,05$ ) / Correlation coefficient is statistically significant at the 95% confidence level ( $p < 0.05$ ).

Имеет место сильная прямая взаимосвязь между активностью радионуклидов и содержанием органического углерода. Содержание органического углерода в поверхностном слое донных отложений Камышовой бухты изменялось от 0,3 % сух. масс. в гравийно-песчаных отложениях верховья бухты до 1,8–2,2 % сух. масс. в пелито-алевритовых илах кутовых частей бухты (рис. 2, *d*). Высокое содержание  $C_{\text{орг}}$  в южной части бухты объясняется многочисленными источниками поступления материала (коммунально-бытовые стоки), а также слабым водообменом [5].

Как отмечалось во введении, содержание  $^{40}\text{K}$  в неорганическом веществе примерно на порядок выше, чем в органическом [17]. Поэтому высокие положительные значения коэффициента корреляции (табл. 2) между активностью  $^{40}\text{K}$  в донных осадках и содержанием илистой фракции, а также долей органического углерода указывают на неорганическую природу ила. Вероятнее всего, в исследуемом районе имеет место процесс очистки вод в результате адсорбции радионуклидов и органического вещества мелкозернистым материалом с последующим захоронением этого материала в донных осадках.

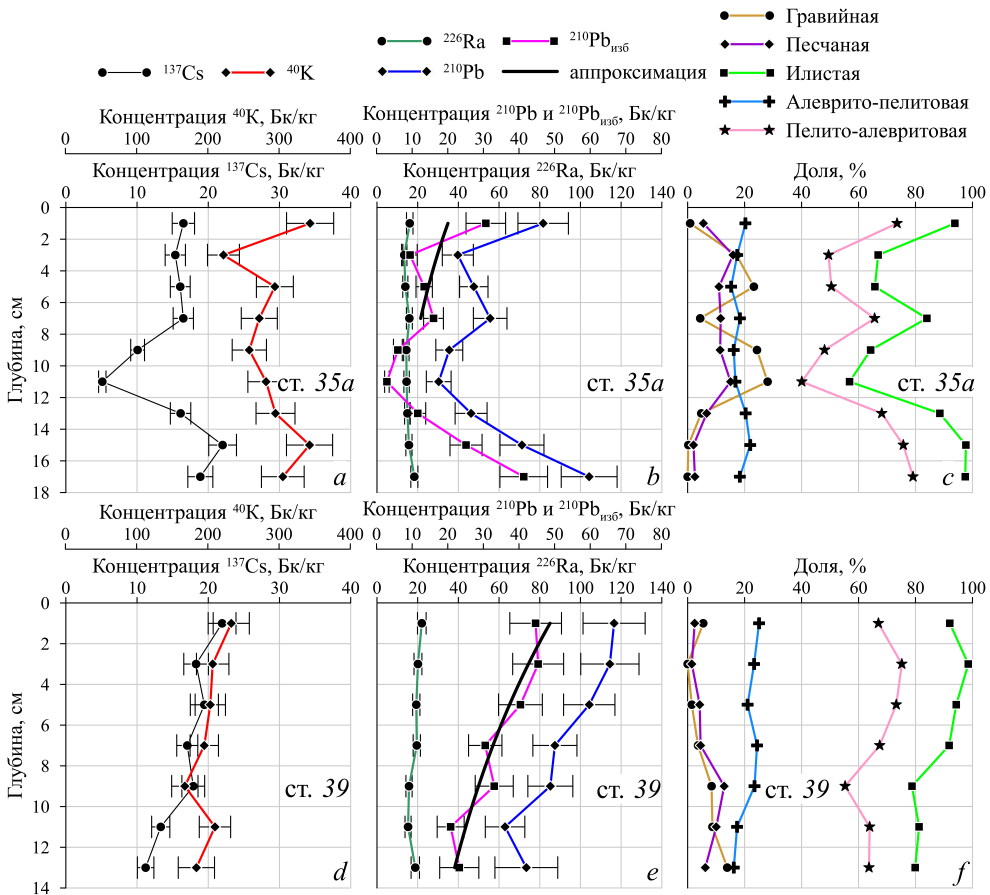
Отмечаются локальные особенности в распределении концентрации отдельных радионуклидов. Так, относительно пониженные значения активности  $^{137}\text{Cs}$  наблюдались на ст. 35, 36 и 38. Вероятно, это связано с близким расположением источников ливневых и бытовых сточных вод (рис. 2, *e*), ожидаемое содержание  $^{137}\text{Cs}$  в которых близко к нулевому. В свою очередь, повышенные значения активности  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ , отмечаемые на ст. 35, 35а, 37 и 39, могут быть связаны с дополнительным поступлением этого радионуклида с ливневыми водами, которые формируются в результате выпадения атмосферных осадков. Высокие значения активности  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$ , отмечаемые на ст. 35а, 36, 37 и 38, по-видимому, обусловлены поступлением терригенного материала в результате абразии берега, поскольку содержание этих радионуклидов в терригенной взвеси выше, чем в биогенной.

#### *Вертикальная изменчивость характеристик донных осадков*

Первая колонка была отобрана на ст. 35а, расположенной в кутовой части бухты на глубине 6 м. Вертикальное распределение  $^{137}\text{Cs}$  в этой колонке неоднородное и изменяется в интервале от  $5,1 \pm 0,5$  до  $22,0 \pm 1,9$  Бк/кг (рис. 3, *a*). Наблюдается ярко выраженный минимум концентрации этого радионуклида в слое 8–12 см, указывающий на наличие события, которое привело к дополнительному поступлению материала иного происхождения в донные осадки. Это событие отражается также в вертикальном профиле гранулометрического состава: доля гравийно-песчаной фракции увеличивается с 22 % в слое 0–8 см до 40 % в обсуждаемом слое. Вертикальное распределение  $^{40}\text{K}$  в колонке неоднородно с минимумом концентрации ( $221,9 \pm 22,4$  Бк/кг) в слое 2–4 см и максимумами ( $343,6 \pm 33,1$  и  $342,8 \pm 32,4$  Бк/кг) в слое 0–2 и 14–16 см соответственно (рис. 3, *a*). Вертикальное распределение  $^{226}\text{Ra}$  на ст. 35а изменяется в пределах погрешности определения его активности и составляет в среднем  $15,3 \pm 1,5$  Бк/кг (рис. 3, *b*). В вертикальном распределении  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  в слое 0–14 см отмечаются чередующиеся участки увеличения и уменьшения его концентрации (от 2,9 до 30,7 Бк/кг), завершающиеся

ростом до  $41,3 \pm 6,7$  Бк/кг в слое 14–18 см. В целом рост концентрации  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  с глубиной указывает на то, что в прошлом имел место дополнительный источник поступления этого радионуклида в донные осадки (рис. 3, b).

Вторая колонка была отобрана на ст. 39, расположенной в центральной части акватории на глубине 13 м. Вертикальное распределение исследуемых радионуклидов на этой станции более однородное, чем на ст. 35a (рис. 3, d, e). Наблюдается плавное уменьшение концентрации  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  с глубиной с 21,9 и 66,7 Бк/кг в слое 0–2 см до 11,2 и 36,1 Бк/кг в слое 12–14 см соответственно. Содержание  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  менялось от 167,7 до 232,8 и от 15,3 до 22,0 Бк/кг соответственно. В целом изменчивость в вертикальном профиле концентрации  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  происходит в пределах погрешностей определения активности этих радионуклидов.



**Р и с. 3.** Вертикальное распределение концентрации  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  (a, b, d, e) и доли гравийной, илистой и песчаной фракций (c, f) для ст. 35a и 39. Черной линией показана экспоненциальная аппроксимация избыточной концентрации  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  в донных осадках

**Fig. 3.** Vertical distribution of the  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{un}}$  concentrations (a, b, d, e), and the shares of the gravel, silt and sand fractions (c, f) for stations 35a and 39. Black line shows exponential approximation of the  $^{210}\text{Pb}_{\text{un}}$  unsupported concentration in the bottom sediments

Таким образом, имеет место пространственная изменчивость вертикального распределения анализируемых радионуклидов: содержание  $^{40}\text{K}$  в донных отложениях на ст. 35а в среднем на 45 % больше, а содержание  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  в среднем меньше на 11, 18 и 49 % соответственно, чем на ст. 39. Для анализа факторов, определяющих выявленные особенности, были проведены оценки скорости осадконакопления.

Особенности изменчивости концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в колонке донных осадков, отобранной на ст. 35а, не позволяют провести датировку осадка и определить скорость осадконакопления, так как в вертикальном распределении концентрации  $^{137}\text{Cs}$  отсутствует выраженный максимум. Это указывает на то, что рассматриваемый слой был сформирован после 1986 г. Для оценки скорости осадконакопления и потока вещества были использованы данные об избыточной активности  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  в первых четырех горизонтах. Выбор горизонтов был основан на данных о вертикальном распределении  $^{137}\text{Cs}$  – в этом интервале наблюдается «стабильное» поступление этого радионуклида в донные осадки. Скорость осадконакопления для этой станции составила 0,39 см/год, поток вещества – 2841 г/(м<sup>2</sup>·год).

В вертикальном профиле концентрации  $^{137}\text{Cs}$ , полученном на ст. 39, также отсутствует ярко выраженный максимум концентрации этого радионуклида. Оценка скорости осадконакопления была проведена для ст. 39 по данным о вертикальном распределении  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ . Согласно полученному результату (рис. 3, е), скорость осадконакопления составила 0,47 см/год. Поток вещества в донные осадки составил 3111 г/(м<sup>2</sup>·год). Как отмечалось ранее, оценки скорости осадконакопления в Камышовой бухте отсутствуют в доступной авторам литературе. Согласно опубликованным данным, скорость осадконакопления и потока вещества в осадок изменяется в бухтах Севастопольского региона в широком диапазоне [12, 22]: 0,35 см/год и 830 г/(м<sup>2</sup>·год) в Стрелецкой бухте, 0,24–0,93 см/год и 607–7094 г/(м<sup>2</sup>·год) в Севастопольской бухте, 0,50–0,55 см/год и 2131–3519 г/(м<sup>2</sup>·год) в Балаклавской бухте. В работе [2] указывается, что численность макрозообентона в Камышовой бухте увеличивалась в период 1991–2000 гг., а затем, по данным за 2003 г., последовал резкий спад (примерно в четыре раза). Согласно полученным оценкам скорости осадконакопления, 2000 г. соответствует глубине осадка около 10 см. Таким образом, минимум доли илистой фракции, наблюдаемый на ст. 39 в слое 8–10 см, может быть обусловлен именно этим событием, что, в свою очередь, подтверждает адекватность оценок скорости осадконакопления, полученных в настоящей работе.

Таким образом, скорости осадконакопления между ст. 35а и 39 различаются примерно на 18 %. Это может объяснить отмеченные выше для этих станций различия в активностях  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{226}\text{Ra}$  (11 и 18 % соответственно). В то же время этим не объясняется различие в активностях  $^{40}\text{K}$  и  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  (45 и 49 %). Такие различия могут быть обусловлены изменчивостью геохимических характеристик осадков. Для того чтобы подтвердить это, был проведен корреляционный анализ. Полученные результаты (табл. 3) указывают на то, что выявленные ранее для поверхностного слоя донных осадков взаимосвязи между активностью  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  в них и их гранулометрическим

составом сохраняются. Таким образом, пространственная изменчивость концентрации  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  обусловлена изменчивостью содержания илистой фракции.

В отношении концентрации  $^{40}\text{K}$  наиболее сильная корреляционная связь наблюдается с долей органического углерода, хотя эта связь статистически достоверна лишь на 90%-ном уровне значимости. Так, рост содержания органического углерода и, соответственно, рост биогенной составляющей осадка сопровождаются снижением концентрации  $^{40}\text{K}$  в нем, что согласуется с литературными данными [12, 16, 17].

Т а б л и ц а 3

Table 3

**Коэффициенты корреляции Пирсона между исследуемыми параметрами в вертикальном профиле донных отложений \***  
**Pearson correlation coefficients between the studied parameters in the vertical profile of bottom sediments \***

Радионуклид / Radio-nuclide	Доля фракции в донных осадках, % / Share of fraction in bottom sediments, %					Содержание Сорг. % / Content of Сорг. %
	гравийной / gravel	песчаной / sand	илистой / silt	алеврито- пелитовой / aleurite-pelitic	пелито- алевритовой / pelite-aleuritic	
$^{137}\text{Cs}$	-0,79 <sup>‡</sup>	-0,65 <sup>‡</sup>	0,78 <sup>‡</sup>	0,68 <sup>‡</sup>	0,72 <sup>‡</sup>	0,36
$^{40}\text{K}$	-0,05	-0,13	0,08	-0,23	0,16	-0,47*
$^{226}\text{Ra}$	-0,57 <sup>†</sup>	-0,77 <sup>‡</sup>	0,67 <sup>‡</sup>	0,65 <sup>‡</sup>	0,61 <sup>‡</sup>	0,67 <sup>‡</sup>
$^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$	-0,76 <sup>‡</sup>	-0,77 <sup>‡</sup>	0,81 <sup>‡</sup>	0,71 <sup>‡</sup>	0,75 <sup>‡</sup>	0,68 <sup>‡</sup>

\* Коэффициент корреляции статистически значим на уровне достоверности 90 % ( $p < 0,1$ ) / Correlation coefficient is statistically significant at the 90% confidence level ( $p < 0.1$ ).

<sup>‡</sup> Коэффициент корреляции статистически значим на уровне достоверности 99 % ( $p < 0,01$ ) / Correlation coefficient is statistically significant at the 99% confidence level ( $p < 0.01$ ).

<sup>†</sup> Коэффициент корреляции статистически значим на уровне достоверности 95 % ( $p < 0,05$ ) / Correlation coefficient is statistically significant at the 95% confidence level ( $p < 0.05$ ).

После усреднения данных о потоке вещества в донные осадки и концентрации радионуклидов в слое 0–5 см были получены количественные оценки средних значений поступления этих радионуклидов в донные осадки. Согласно полученным результатам, эти значения составили 53,0 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{137}\text{Cs}$ , 690,5 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{40}\text{K}$ , 58,0 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{226}\text{Ra}$  и 79,5 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ . Для сравнения: в Севастопольской бухте значения потока  $^{137}\text{Cs}$  в донные отложения находятся в интервале 59,8–667,0 Бк/(м<sup>2</sup>·год) [26], в Стрелецкой бухте – 57,7 Бк/(м<sup>2</sup>·год) [30]. Таким образом, оценки, полученные в настоящем исследовании, не противоречат литературным данным.

### Выводы

Согласно полученным результатам, значения концентрации  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  в поверхностном слое донных отложений Камышовой бухты изменялись в диапазоне 7–32, 3–20, 1–21 и 31–314 Бк/кг соответственно.

Установлено, что в пространственной изменчивости концентраций рассматриваемых радионуклидов отмечается общая тенденция к увеличению

значений от северной части бухты к южной. Результаты корреляционного анализа указывают на сильную прямую взаимосвязь между активностью радионуклидов и долей илстой фракции (в среднем  $r = 0,85$ ) и содержанием органического углерода (в среднем  $r = 0,81$ ). В случае с  $^{40}\text{K}$  наблюдаемые положительные значения коэффициентов корреляции указывают на то, что в исследуемом районе имеет место процесс очистки вод в результате адсорбции радионуклидов и органического вещества мелкозернистым материалом с последующей седиментацией этого материала в донные осадки. Локальные особенности пространственной изменчивости содержания радионуклидов могут быть обусловлены поступлением терригенного материала в результате абразии берегов и ливневого стока и биогенного материала с коммунально-бытовыми стоками.

Установлена пространственная изменчивость вертикального распределения концентрации радионуклидов в двух колонках: содержание  $^{40}\text{K}$  в донных отложениях на станции 35а в среднем на 45 % больше, а содержание  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$  в среднем соответственно на 11, 18 и 49 % меньше, чем на ст. 39. Показано, что такая изменчивость связана с пространственной неоднородностью скорости седиментации и геохимических характеристик осадков.

Поток радионуклидов в донные осадки составил 53,0 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{137}\text{Cs}$ , 690,5 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{40}\text{K}$ , 58,0 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{226}\text{Ra}$  и 79,5 Бк/(м<sup>2</sup>·год) для  $^{210}\text{Pb}_{\text{изб}}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / Е. А. Куфтаркова [и др.] // Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 2008. Т. 46. С. 110–117. EDN VSMAXD.
2. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века / под ред. О. Г. Миронова, С. В. Алёмова. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2018. 270 с.
3. *Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алёмов С. В.* Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с.
4. *Соловьёва О. В., Тихонова Е. А.* Динамика содержания органического вещества в донных отложениях портовых акваторий Севастополя // Ученые записки Крымского Федерального Университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2018. Т. 4 (70), № 4. С. 196–206.
5. Окислительно-восстановительные условия и характеристики донных отложений бухт Севастопольского региона / Ю. С. Куринная [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 1. С. 42–54. doi:10.22449/2413-5577-2022-1-42-54
6. *Мирзоева Н. Ю., Гулин С. Б., Мирошниченко О. Н.* Радионуклиды стронция и цезия // Система Черного моря / Отв. ред. академик РАН А. П. Лисицын. М. : Научный мир, 2018. С. 605–624. <https://doi.org/10.29006/978-5-91522-473-4.2018>
7. Partitioning of Cs-137 between sediment and water from the Black Sea / M. Fuhrmann [et al.] // Chemistry and Ecology. 1992. Vol. 7, iss. 1–4. P. 3–17. <https://doi.org/10.1080/02757549208055429>
8. *Buesseler K. O., Livingston H. D.* Time-Series Profiles of  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the Black Sea // Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea / Eds. E. Özsoy, A. Mikaelyan. Dordrecht : Springer, 1997. P. 239–251. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-5758-2\\_19](https://doi.org/10.1007/978-94-011-5758-2_19)

9. Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Г. Г. Поликарпов [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 666 с.
10. Evolution and fluxes of  $^{137}\text{Cs}$  in the Black Sea/Turkish Straits System/North Aegean Sea / R. Delfanti [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2014. Vol. 135. P. 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.01.006>
11. Radionuclides Assessment for the Romanian Black Sea Shelf / G. Chiroșca [et al.] // *Diversity in Coastal Marine Sciences* / Eds. C. Finkl, C. Makowski. Cham : Springer, 2018. P. 221–232. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-57577-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-57577-3_13)
12. Оценка скорости седиментации и осадконакопления в прибрежных и глубоководных акваториях Черного моря с использованием природных и антропогенных (чернобыльских) радионуклидов / Н. Ю. Мирзоева [и др.] // Система Черного моря / Отв. ред. академик РАН А. П. Лисицын. М. : Научный мир, 2018. С. 659–670. <https://doi.org/10.29006/978-5-91522-473-4.2018>
13. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  в поверхностном слое Черного моря летом 2017 года / И. И. Довгий [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 2. С. 166–175. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-2-166-175>
14. The approaching obsolescence of  $^{137}\text{Cs}$  dating of wetland soils in North America / J. Z. Drexler [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. 2018. Vol. 199. P. 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.08.028>
15. A global review of sediment source fingerprinting research incorporating fallout radiocesium ( $^{137}\text{Cs}$ ) / O. Evrard [et al.] // *Geomorphology*. 2020. Vol. 362. 107103. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107103>
16. Гулин С. Б., Сидоров И. Г., Гулина Л. В. Биогенная седиментация в Черном море: радиотрассерное исследование // *Морской экологический журнал*. 2013. Т. 12, № 2. С. 19–25. EDN SZIOVD.
17.  $^{40}\text{K}$  in the Black Sea: a proxy to estimate biogenic sedimentation / S. B. Gulin [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. Vol. 134. P. 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.02.011>
18. Русаков, В. Ю., Борисов, А. П., Соловьева Г. Ю. Скорости седиментации (по данным изотопного анализа  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ) в разных фациально-генетических типах донных осадков Карского моря // *Геохимия*. 2019. Т. 64, № 11. С. 1158–1174. <https://doi.org/10.31857/S0016-752564111158-1174>
19. *Kremenchutskii D. A., Gurov K. I.* Assessment of sedimentation rate in the Balaklava Bay by radionuclides // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2020 (Albena, Bulgaria, 18 August – 24 August, 2020) : proceedings. Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology, 2020. Vol. 20, iss. 5.1. P. 83–90. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/5.1/s20.011>
20. *Abril J. M.* On the use of  $^{210}\text{Pb}$ -based records of sedimentation rates and activity concentrations for tracking past environmental changes // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022. Vol. 244–245. 106823. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106823>
21. Assessment of measurement accuracy in  $^{210}\text{Pb}$  dating sediment methods / A. Schirone [et al.] // *Quaternary Geochronology*. 2022. Vol. 69. 101255. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101255>
22. *Кремичуцкий Д. А., Гуров К. И.* Распределение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 2. С. 207–221. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-207-221>
23. *Robbins J. A., Edgington D. N., Kemp A. L. W.* Comparative  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , and pollen geochronologies of sediments from lakes Ontario and Erie // *Quaternary Research*. 1978. Vol. 10, iss. 2. P. 256–278. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(78\)90105-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90105-9)
24. *Currie L. A.* Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry // *Analytical Chemistry*. 1968. Vol. 40, iss. 3. P. 586–593. <https://doi.org/10.1021/ac60259a007>

25. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсянный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. С. 138–152.
26. Биогеохимические характеристики седиментационного самоочищения Севастопольской бухты от радионуклидов, ртути и хлорорганических загрязнителей / В. Н. Егоров [и др.] // Морской биологический журнал. 2018. Т. 3, № 2. С. 40–52. EDN XSWAXJ. <https://doi.org/10.21072/mbj.2018.03.2.03>
27. Partition of radiotracers between suspended particles and seawater / Y.-H. Li [et al.] // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1984. Vol. 48, iss. 10. P. 2011–2019. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90382-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90382-X)
28. *Hawley N., Robbins J. A., Eadie B. J.* The partitioning of <sup>7</sup>beryllium in fresh water // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1986. Vol. 50, iss. 6. P. 1127–1131. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(86\)90393-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(86)90393-5)
29. Role of suspended matter in controlling beryllium-7 (<sup>7</sup>Be) in the Black Sea surface layer / D. A. Kremenchutskii [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2021. Vol. 217. 103513. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103513>
30. Биогеохимические механизмы формирования критических зон в Черном море в отношении загрязняющих веществ / В. Н. Егоров [и др.] // *Морской экологический журнал*. 2013. Т. 12, № 4. С. 5–26. EDN SYSNGP.

*Об авторах:*

**Кременчуцкий Дмитрий Александрович**, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8747-6612**, **ResearcherID: AAC-1673-2020**, [d.kremenchutskii@mhi-ras.ru](mailto:d.kremenchutskii@mhi-ras.ru)

**Гурова Юлия Сергеевна**, младший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-9826-4789**, **ResearcherID: AAB-5628-2019**, [kurinnaya-jul@yandex.ru](mailto:kurinnaya-jul@yandex.ru)