

Распределение ^{137}Cs и ^{40}K в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море)

Д. А. Кременчуцкий, К. И. Гуров ✉

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
✉ gurovki@gmail.com

Цель. Изучение распределения концентраций ^{137}Cs и ^{40}K в донных отложениях Балаклавской бухты, оценка скорости осадконакопления и относительного содержания биогенного вещества – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Представлены результаты измерений концентрации ^{137}Cs и ^{40}K в 5 колонках донных отложений, отобранных в различных частях Балаклавской бухты. Определения активности ^{137}Cs и ^{40}K в пробах были выполнены на основе гамма-спектрометрического анализа. По результатам измерений исследована пространственная изменчивость концентрации ^{137}Cs и ^{40}K в донных отложениях, получены количественные оценки скорости седиментации. С использованием балансового уравнения получены количественные оценки относительного содержания биогенного вещества и описана его пространственная изменчивость. Представлены количественные оценки взаимосвязи результатов оценок биогенного вещества с использованием прямого и косвенного методов.

Выводы. Согласно приведенным результатам, концентрация ^{137}Cs и ^{40}K в верхнем 5-сантиметровом слое донных отложений изменялась по пространству в диапазонах 11–62 и 155–562 Бк/кг соответственно. Максимальные величины концентрации радионуклидов были характерны для северной части бухты, минимальные – для южной. Средняя скорость осадконакопления составила $0,50 \pm 0,06$ см/год. Относительное содержание биогенного вещества в осадках изменялось по пространству в пределах 30–89% и составило в среднем $46 \pm 25\%$. Максимальные величины отмечались в южной части бухты, минимальные – в северной.

Ключевые слова: Черное море, Балаклавская бухта, донные отложения, цезий-137 (^{137}Cs), калий-40 (^{40}K), скорость осадконакопления, биогенное вещество

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» и при поддержке гранта РФФИ № 18-45-920007 «Геохимия загрязняющих веществ донных отложений Балаклавской бухты (Черное море)».

Для цитирования: Кременчуцкий Д. А., Гуров К. И. Распределение ^{137}Cs и ^{40}K в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 207–221. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-207-221

Distribution of ^{137}Cs and ^{40}K in the Bottom Sediments of the Balaklava Bay (the Black Sea)

D. A. Kremenchutskii, K. I. Gurov ✉

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ gurovki@gmail.com

Purpose. The aim of the work is to study spatial variability of the ^{137}Cs and ^{40}K concentrations in the bottom sediments of the Balaklava Bay, and to estimate the sedimentation rate and relative content of the biogenic fraction.

Methods and Results. The results of the ^{137}Cs and ^{40}K concentration measurements in 5 columns of the bottom sediments sampled in various parts of the Balaklava Bay are represented. Activity of ^{137}Cs and ^{40}K in the samples was determined by the gamma spectrometric analysis. Based on the measurement data, spatial variability of the ^{137}Cs and ^{40}K concentration fields in the bottom sediments was studied, and the sedimentation rate was quantitatively estimated. Application of the balance equation provided quantitative estimates of the relative biogenic fraction content; its spatial variability was described. Quantitative estimates of the relationship between the biogenic fraction estimates resulted from use of the direct and indirect methods are represented.

Conclusions. According to the obtained results, the ^{137}Cs and ^{40}K concentrations in the upper 5 cm layer of bottom sediments varied in space from 11 to 62 and from 155 to 562 Bq/kg, respectively. The maximum radionuclide concentrations were characteristic of the northern part of the bay, the minimum ones – of its southern part. The sedimentation average rate was 0.51 ± 0.06 cm/year. Relative biogenic fraction content in the sediments varied in space from 30 to 89% and averaged $46 \pm 25\%$. The maximum values were observed in the southern part of the bay, the minimum ones – in the northern part.

Keywords: Black Sea, Balaklava Bay, bottom sediments, cesium-137 (^{137}Cs), potassium-40 (^{40}K), sedimentation rate, biogenic fraction

Acknowledgements: The investigation was carried out within the framework of the state task on theme No. 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary investigations of the oceanologic processes conditioning functioning and evolution of the Black and Azov seas’ ecosystems of the coastal zones” with support of the RFBR project No. 18-45-920007 “Geochemistry of bottom sediments pollutants of the Balaklava Bay (the Black Sea)”.

For citation: Kremenchutskii, D.A. and Gurov, K.I. 2021. Distribution of ^{137}Cs and ^{40}K in the Bottom Sediments of the Balaklava Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(2), pp. 191-204. doi:10.22449/1573-160X-2021-2-191-204

Введение

Известно, что прибрежные районы являются местом активной антропогенной деятельности, которая приводит к изменению естественных скоростей геохимических процессов и способствует повышению уровня загрязнения донных отложений. Загрязнение радионуклидами – сравнительно новый, тем не менее достаточно изученный вид загрязнения окружающей среды. Интенсификация промышленной деятельности в XIX в. привела к росту поступления в аквальные системы отдельных микроэлементов в результате их прямого сброса (локальные загрязнения) и вымывания атмосферными осадками (глобальные выпадения) и обусловила усложнение их геохимического баланса и общего состояния.

Благодаря своим уникальным природно-климатическим условиям и морфометрическим характеристикам Балаклавская бухта занимает особое место среди бухт Севастопольского региона. Еще в конце XIX в. она использовалась

как район грязелечения. Активное антропогенное освоение во второй половине XX в. стало причиной изменения ее морфометрических параметров, поступления и накопления большого количества загрязняющих веществ и, как следствие, привело к ухудшению ее экологического состояния, в результате лечебные илы сменились техногенными. В настоящее время активное использование бухты в качестве яхтенной марины поддерживает высокий уровень антропогенной нагрузки на ее экосистему и может привести к ухудшению ее экологического состояния. В то же время сохранение такого уникального природного объекта является важной задачей для развития курортно-рекреационного комплекса всего региона.

Изучение донных отложений Балаклавской бухты носит эпизодический характер. Современные исследования особенностей пространственного распределения и количественных характеристик накопления отдельных фракций, органического вещества и микроэлементов в акватории Балаклавской бухты представлены в работах сотрудников Морского гидрофизического института [1–5]. В настоящее время большое внимание уделяется загрязнению донных отложений органическими веществами [2, 3] и тяжелыми металлами [3, 4]. В работе [2] впервые для акватории Балаклавской бухты было выполнено полярнографическое профилирование толщи донных отложений и исследованы геохимические характеристики поровых вод. В работе [5] получены численные оценки загрязнения акватории бухты избыточным суммарным взвешенным веществом, растворенным органическим веществом искусственного происхождения (показатель биологического загрязнения) и нефтепродуктами. Согласно данным работ [1, 4], гранулометрический состав донных отложений постоянно меняется. В первую очередь это обуславливается увеличением доли мелкодисперсных пелитовых илов, сокращением доли песчаного и крупнодисперсного ракушечного материала. Сброс неочищенных бытовых сточных вод, промышленные стоки, ливневая канализация, утечки нефтепродуктов с судов, базирующихся и ремонтирующихся в бухте, смыв с полей и поступление удобрений и пестицидов с водами реки Балаклавка – основные предполагаемые источники загрязнения донных отложений Балаклавской бухты.

Цезий-137 (^{137}Cs) – искусственный радионуклид техногенного происхождения с периодом полураспада 30,05 лет. Его поступление в Черное море обусловлено атмосферными выпадениями и речным стоком [6]. Исследованию пространственно-временной изменчивости его содержания в воде и донных отложениях Черноморского региона посвящен ряд работ [6–13]. Данный радионуклид широко используется при получении количественных оценок скорости осадконакопления [12, 14, 15].

Калий-40 (^{40}K) – естественный радионуклид природного происхождения с периодом полураспада $1,25 \cdot 10^9$ лет. Изучению данного радионуклида также уделяется большое внимание [11, 12, 16, 17]. Концентрация ^{40}K в оседающем веществе литогенного происхождения примерно на один порядок выше, чем в оседающем веществе биогенного происхождения [18–22]. Эта его особенность может быть использована для получения количественных оценок доли биогенной составляющей в донных отложениях [12, 16, 17]. Согласно работам [17, 23, 24], биогенная составляющая донных осадков представляет собой смесь частиц органического углерода, карбонатных или кремнистых остатков

раковин и скелетов планктонных микроорганизмов. Оценка накопления биогенного вещества важна в связи с его особой чувствительностью к изменению климата и антропогенному воздействию, она имеет большое значение для изучения циклов углерода и различных загрязняющих веществ.

Основываясь на доступных авторам литературных сведениях, следует отметить, что данные о содержании ^{137}Cs и ^{40}K в донных отложениях Балаклавской бухты отсутствуют.

Целью настоящего исследования является изучение содержания ^{137}Cs и ^{40}K в донных отложениях Балаклавской бухты, а также оценка скорости осадконакопления и относительного содержания биогенного вещества.

Материалы и методы

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

Отбор проб колонок проводился с помощью акриловой грунтовой трубки с внутренним диаметром 60 мм и вакуумным затвором. На борту колонки закрывали снизу пробкой и транспортировали в лабораторию. В лаборатории колонки разделяли на слои толщиной 1–2 см с помощью ручного экструдера и кольца из акрила. Далее пробоподготовка выполнялась согласно нормативным документам для других анализов.

Естественную влажность определяли весовым методом по стандартной методике (ГОСТ Р ИСО 11465-2011; введен с 01.01.2013 г.). После просушивания проба измельчалась и гомогенизировалась. Часть этой пробы с известной массой упаковывалась в пластиковые виалы объемом 20 мл для последующего гамма-спектрометрического анализа.

Измерения активности ^{137}Cs и ^{40}K в пробах донных осадков проводились на низкофоновом гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) колодезного типа. Диаметр кристалла составляет 100 мм, его высота 100 мм. Диаметр колодца 40 мм, его глубина 60 мм. Разрешение 9% по линии ^{137}Cs с энергией 661 кэВ. Сцинтиблок располагался в двухслойной защите, внешний слой которой образован кирпичами низкофонового свинца (14 см), внутренний – кольцами из старого чугуна (15 см). Время измерения единичной пробы определялось исходя из ее активности и изменялось в диапазоне 24–48 ч.

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

Концентрация ^{137}Cs ($C_{137\text{Cs}}$) и ^{40}K ($C_{40\text{K}}$) в пробах донных осадков рассчитывалась по следующей формуле:

$$C = \frac{N}{tm\varepsilon(E)\gamma(E)K},$$

где C – концентрация радионуклида (Бк/кг); N – площадь фотопика радионуклида (импульсы); t – время набора спектра (с); m – масса пробы (кг); $\varepsilon(E)$ – эффективность регистрации гамма-квантов с энергией E ; $\gamma(E)$ – выход гамма-

квантов с энергией E при распаде соответствующего радионуклида; K – коэффициент, учитывающий распад радионуклида за промежуток времени (Δt) от отбора пробы до начала регистрации ее активности.

Оценки K были получены по формуле

$$K = \exp(-\lambda \Delta t),$$

где λ – постоянная распада, равная $7,31 \cdot 10^{-10}/\text{с}$ и $1,741 \cdot 10^{-17}/\text{с}$ для ^{137}Cs и ^{40}K соответственно.

Оценки минимально детектируемой активности были получены согласно [25]. Нижний предел обнаружения для ^{137}Cs составляет 4 Бк/кг, для ^{40}K – 30 Бк/кг.

Погрешность определения активности радионуклидов обусловлена статистической погрешностью их счета в препарате (1σ) с учетом статической погрешности счета фона и калибровки эффективности. В большинстве случаев суммарная величина погрешности не превышала 15%.

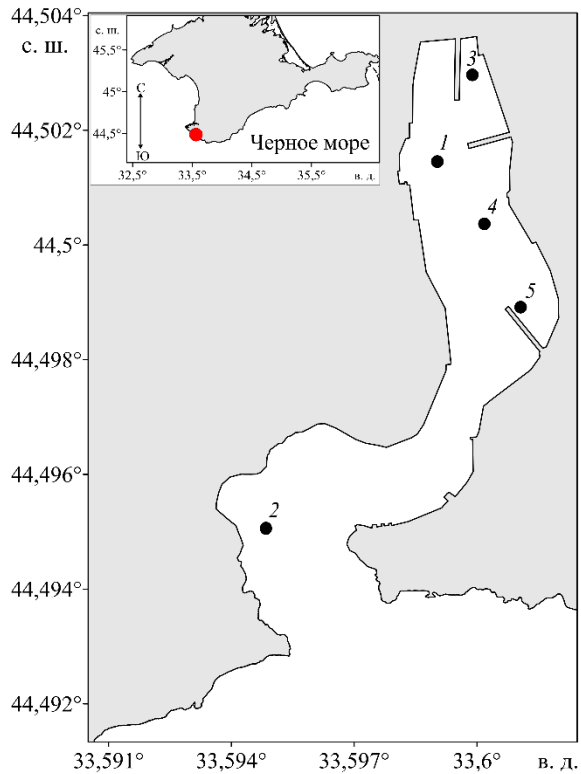
Карбонатность (CaCO_3) в пробе находили весообъемным методом после разложения карбонатов соляной кислотой с учетом методических рекомендаций руководства *UNEP*. В результате повторных анализов проб со средней величиной 6,84% CaCO_3 получено среднее квадратическое отклонение $\pm 0,18\%$ (коэффициент вариации 2,6%) (*UNEP/IOC/IAEA* – 1995 г.).

Концентрацию органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в пробе определяли спектрофотометрическим методом после окисления органического вещества сульфохромной смесью (ГОСТ 26213-91; введен с 30.06.1993 г.).

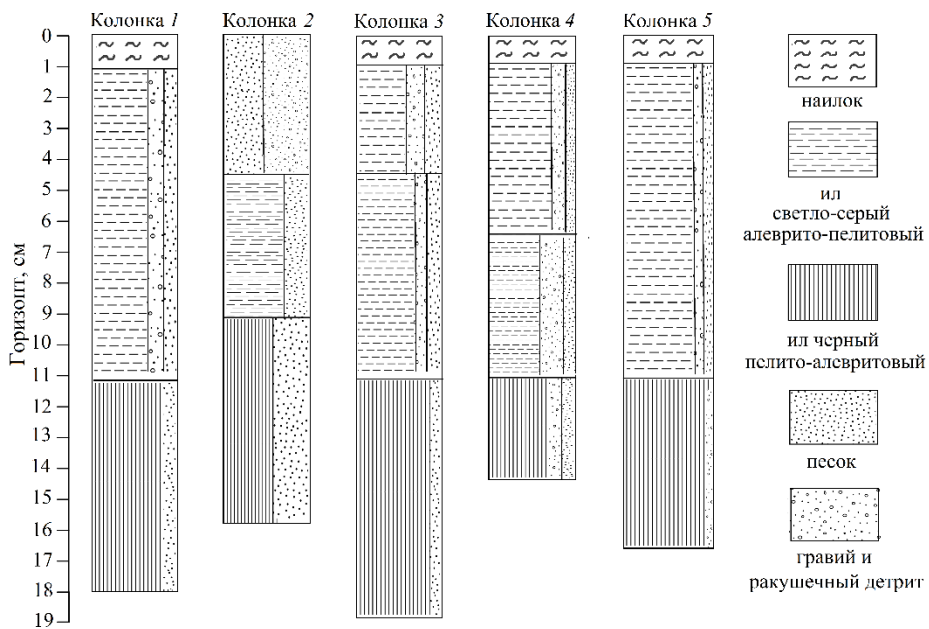
Результаты и обсуждение

Схема расположения станций показана на рис. 1. В общей сложности было отобрано 5 колонок донных отложений: две колонки в июне 2015 г. (ст. 1 и 2) и три колонки в сентябре 2019 г. (ст. 3–5).

Колонки 1 и 3–5, отобранные в северном бассейне бухты на глубинах 6–9 м, отражают условия седиментации в полузамкнутой акватории, испытывающей максимальную антропогенную нагрузку. В этой части бухты гидродинамические процессы выражены слабо, поступление материала определяется ливневым и коммунальным стоками. Колонка 2 была отобрана в акватории южного бассейна на глубине 13 м. Данный участок отличается повышенной гидродинамической активностью в связи с его близостью к открытому морю. Основные источники поступления материала – городской пляж и ливневый сток. По литологическому описанию колонки, отобранные в северном бассейне, сходны друг с другом (рис. 2). Верхний слой 0–1 см – светло-коричневый жидкий наилот с включениями растительных остатков и ракушки. Ниже (слой 1–11 см) осадок представлен светло-серыми, серыми илами, включения битой ракушки и песка отмечаются неравномерно, характерен нефтяной запах. Ниже (слой 11–19 см) осадок плотный, цвет переходит от темно-серого к черному, включения ракушечного детрита минимальны. Для колонки 2 в поверхностном слое (0–5 см) отмечено повышенное содержание песчаного материала, отдельных раковин и ракушечного детрита, нефтяной запах отсутствует. С глубиной содержание гравийно-песчаного материала незначительно убывает, а доля темно-серого ила увеличивается.

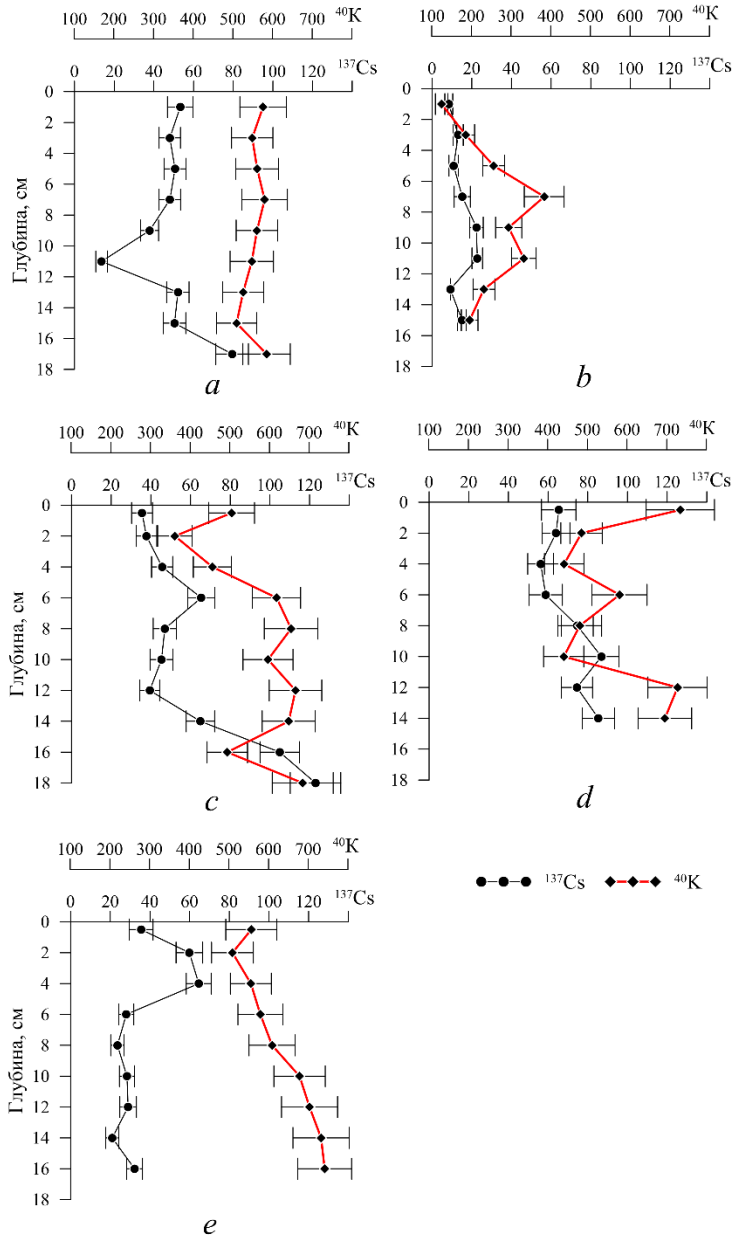


Р и с. 1. Схема станций отбора проб донных отложений
Fig. 1. Layout of the bottom sediment sampling stations



Р и с. 2. Литологическая схема осадочного разреза колонок донных отложений
Fig. 2 Lithological scheme of sedimentary sections of the bottom sediment columns

Средняя величина влагосодержания изменялась от 58% в слое 0–5 см до 41% в слое 15–20 см. Отмечено, что величины уменьшаются с глубиной практически в полтора раза. Исключение составляет колонка 4, в которой значения влажности с глубиной растут, достигая максимума в слое 5–7 см, а затем убывают. Это может указывать на гравитационное оползание осадка вдоль склона.



Р и с. 3. Вертикальное распределение концентрации (Бк/кг) ^{137}Cs и ^{40}K в донных отложениях: *a* – на ст. 1; *b* – на ст. 2; *c* – на ст. 3; *d* – на ст. 4; *e* – на ст. 5

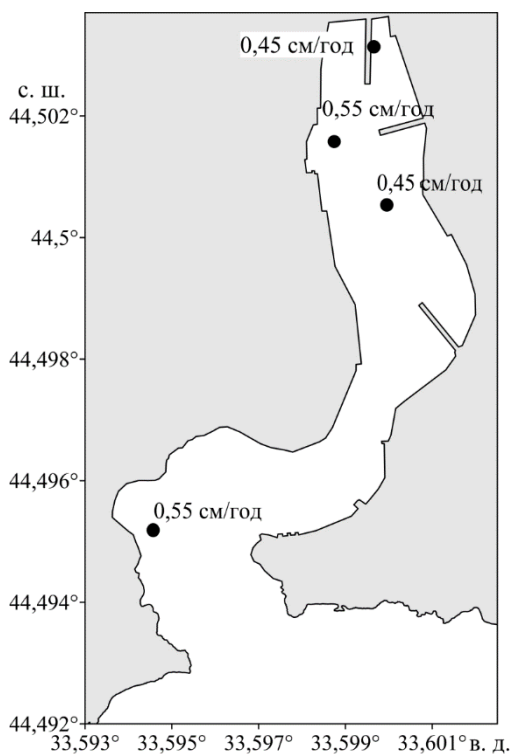
Fig. 3. Vertical distribution, (Bq/kg), of the ^{137}Cs and ^{40}K concentrations in bottom sediments: *a* – at station 1; *b* – at station 2; *c* – at station 3; *d* – at station 4; *e* – at station 5

Величины концентрации ^{137}Cs и ^{40}K в донных отложениях изменялись в диапазонах 8,4–132,0 и 125–742 Бк/кг соответственно. Средние величины концентрации ^{137}Cs и ^{40}K составляли $46,5 \pm 26,2$ и 528 ± 158 Бк/кг соответственно.

Профили вертикального распределения концентрации ^{137}Cs и ^{40}K имеют сложный характер (рис. 3), наблюдаются локальные максимумы или минимумы в концентрации радионуклидов, природа которых неочевидна. Такое распределение ^{137}Cs и ^{40}K может свидетельствовать о наличии пространственно-временной изменчивости в скорости осадконакопления и активном перераспределении донных отложений в исследуемой акватории.

Оценка скорости осадконакопления

В профиле вертикального распределения концентрации ^{137}Cs в донных отложениях имеется два характерных участка (максимума концентрации), соответствующих 1963 и 1986 гг. [12, 26]. Анализируемые в данной работе колонки имеют недостаточную длину для идентификации положения ближайшего максимума, соответствующего 1986 г.



Р и с. 4. Пространственное распределение скоростей осадконакопления

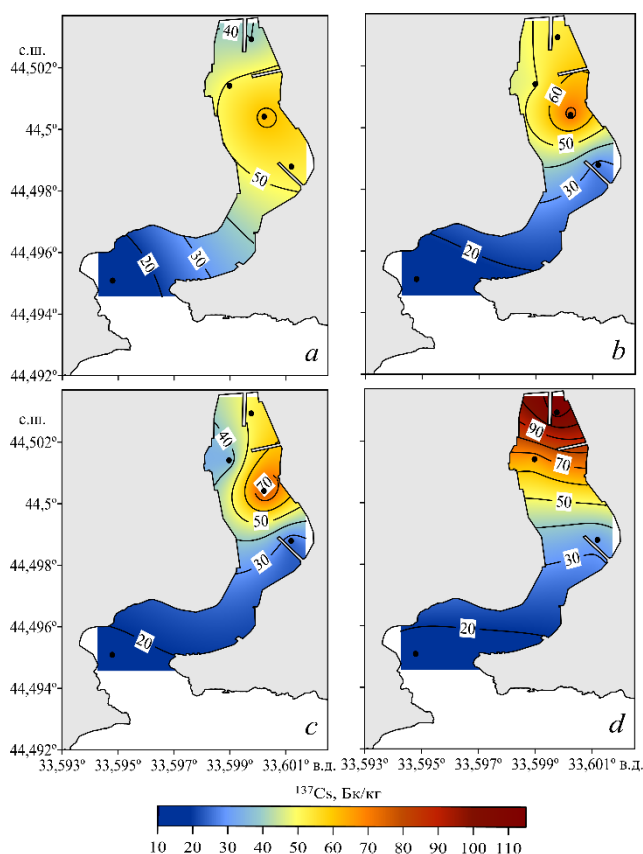
Fig. 4. Spatial distribution of sedimentation rate

копления в Балаклавской бухте изменяется по пространству в диапазоне 0,52–0,55 см/год.

В то же время в вертикальных профилях ^{137}Cs хорошо выделяются участки, на которых величина концентрации этого радионуклида изменяется в пределах погрешности относительно его концентрации в верхних слоях осадка или выявляет тенденцию к монотонному росту. В качестве примера: нижняя граница такого участка на рис. 3, а соответствует слою 14–16 см, на рис. 2, с – слою 13–15 см. Основываясь на этих данных, представляется возможным оценить минимальную скорость осадконакопления, предполагая, что нижняя граница выделяемых участков соответствует 1986 г. Результаты оценок показаны на рис. 4. Согласно полученным оценкам, скорость осадконакопления изменяется по пространству в диапазоне 0,45–0,55 см/год и составляет в среднем $0,50 \pm 0,06$ см/год. Этот результат хорошо согласуется с оценками, полученными по данным о вертикальном распределении ^{90}Sr в 2008–2012 гг. [12]. Согласно данным этой работы, скорость осадкона-

Пространственное распределение ^{137}Cs и ^{40}K

Осредненные характеристики пространственного распределения концентраций ^{137}Cs и ^{40}K в донных отложениях были получены для четырех интервалов: 0–5, 6–10, 11–15, 16–20 см. Учитывалось, что первые две колонки были отобраны на четыре года раньше, чем последующие три. Для этого, основываясь на оценках скоростей осадконакопления, полученных в настоящей работе и представленных в [12], было сделано предположение, что различие между слоями первых двух колонок и последующих трех составляет 2 см ($0,5 \text{ см/год} \times 4 \text{ года}$). Другими словами, слой 0–2 см первых двух колонок примерно соответствует слою 2–4 см последующих трех.

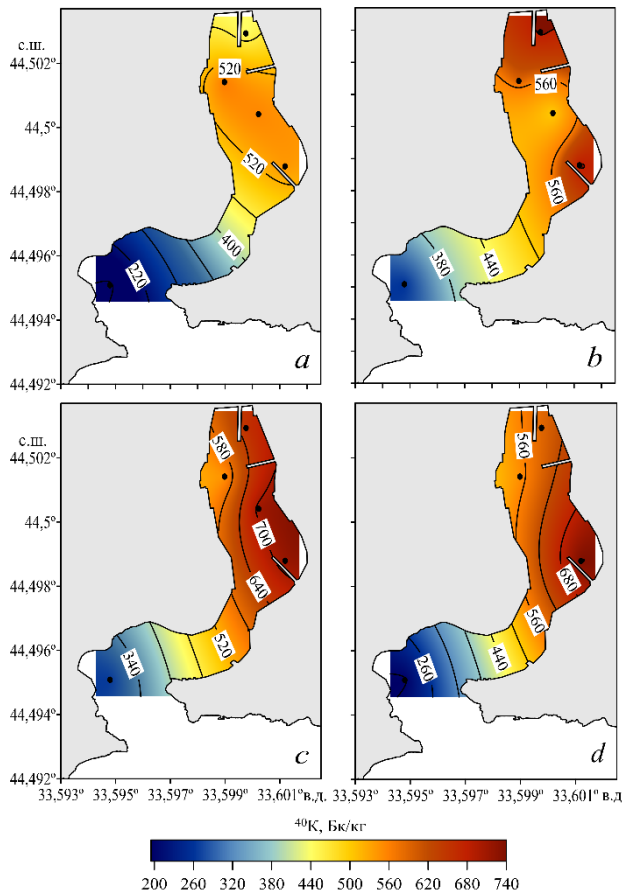


Р и с. 5. Пространственное распределение концентрации ^{137}Cs в слоях 0–5 см (a), 6–10 см (b), 11–15 см (c), 16–20 см (d)

Fig. 5. Spatial distribution of the ^{137}Cs concentration in the layers 0–5 cm (a), 6–10 cm (b), 11–15 cm (c) and 16–20 cm (d)

Согласно полученным результатам (рис. 5, a), концентрация ^{137}Cs в верхнем слое донных отложений изменялась по пространству в диапазоне 11–62 Бк/кг и составляла в среднем 43 ± 20 Бк/кг. В нижерасположенных слоях донных отложений (рис. 5, b – d) наблюдался рост величины концентрации радионуклида, достигающей на отдельной станции 114 Бк/кг. Максимальные ве-

личины концентрации ^{137}Cs наблюдаются в северной части бухты во всем исследуемом диапазоне донных отложений, минимальные – в южной. Отметим, что содержание ^{137}Cs в северной части бухты примерно в 5 раз выше, чем в южной. Концентрация ^{137}Cs в донных отложениях и его пространственное распределение зависят от уровней его активности в воде и содержания взвешенного вещества [7, 15, 27]. Природа последнего может также оказывать влияние на величину относительного содержания радионуклида на взвешенном веществе и соответственно – на его поток в донные отложения [7, 15, 28]. Согласно данным работы [5], наиболее загрязненные области Балаклавской бухты – ее кутовая часть и участок вблизи выпуска сточных вод на выходе из бухты. По данным оптических измерений, здесь зафиксированы величины мутности, в десятки раз превосходящие природную норму, а также повышенные концентрации суммарной взвеси и растворенной органики. В работе [29] описаны особенности циркуляции вод Балаклавской бухты, выявленные на основе результатов численного моделирования. Отмечено, что наличие локальных



Р и с. 6. Пространственное распределение концентрации ^{40}K в слоях 0–5 см (а), 6–10 см (b), 11–15 см (c), 16–20 см (d)
F i g. 6. Spatial distribution of the ^{40}K concentration in the layers 0–5 cm (a), 6–10 cm (b), 11–15 cm (c), 16–20 cm (d)

вихревых структур в поле течений может приводить к возникновению областей максимальных концентраций загрязнений на границе между центральной и северной частью бухты.

Концентрация ^{40}K в верхнем слое донных отложений изменялась по пространству в пределах 155–562 Бк/кг, составляла в среднем 450 ± 172 Бк/кг и имела тенденцию к увеличению с глубиной (рис. 6). Максимальные величины концентрации ^{40}K были характерны для северной части бухты, минимальные – для южной. Как уже отмечалось ранее, концентрация ^{40}K в донных отложениях и его пространственное распределение зависят от происхождения оседающего вещества [16, 17]. Повышенные величины концентрации ^{40}K в северной части бухты свидетельствуют об относительно повышенной доли литогенной составляющей в оседающей взвеси.

Подобие в пространственном распределении концентрации радионуклидов (коэффициент корреляции 0,51, $p = 0,027$) может быть обусловлено тем, что ^{137}Cs на морское дно оседает преимущественно в составе литогенного вещества [30, 31].

Полученные значения величин концентрации радионуклидов не противоречат литературным данным. Согласно [12], уровни концентрации ^{137}Cs и ^{40}K в донных осадках Севастопольской бухты, отобранных в 2008–2012 гг., изменялись по пространству в интервале 70–80 и 281–702 Бк/кг соответственно.

Оценка доли биогенного вещества

В работах [16, 17] предложен метод, позволяющий по данным о концентрации ^{40}K в пробах донных осадков определить долю биогенного вещества (BF , %) в них с использованием балансового уравнения

$$BF = \frac{Clk_L - C_K}{Clk_L - Clk_B} 100,$$

где Clk_L и Clk_B – величины кларков калия в литогенном и биогенном веществах, равные 24–26 и 2–3 гК/кг [18–22] соответственно; C_K – концентрация калия (стабильного и радиоактивного) в донных осадках (в гК/кг).

Известно, что активность 1 г природного калия равна 30,65 Бк [21]. Таким образом, общее содержание калия в пробах донных осадков может быть получено по данным о его концентрации по следующей формуле:

$$C_K = \frac{C_{40\text{K}}}{30,65} 100.$$

При проведении оценок величины Clk_L и Clk_B предполагались равными 25 и 2,5 гК/кг соответственно.

Согласно полученным расчетам (рис. 7, *a*), доля биогенного вещества в верхних слоях донных отложений изменялась по пространству в пределах 30–89% и составляла в среднем $46 \pm 25\%$. Максимальные величины наблюдались в южной части бухты, минимальные – в северной. Отметим, что относительное содержание биогенного вещества в южной части бухты было в 2–3 раза выше, чем в северной. Наблюдалась тенденция к уменьшению доли биогенного вещества в нижерасположенных слоях отложений (рис. 7, *b–d*).

Доля биогенного вещества в донных отложениях может быть также определена как сумма относительных величин содержания органического углерода, карбонатов (CaCO_3) и силикатов (SiO_2) [17]. Для отдельных слоев колонки, отобранной на ст. 2 (рис. 1), были выполнены определения этих параметров и проведены оценки доли биогенного вещества.

Анализ особенностей вертикального распределения исследуемых параметров показал, что содержание $S_{\text{орг}}$ в поверхностном слое минимально (0,48%), с глубиной его концентрации увеличиваются и составляют 2,43 и 2,46% на горизонтах 7 и 11 см соответственно. Содержание карбонатов с глубиной, наоборот, уменьшается от 79% в слое 0–2 см до 48% в слое 10–12 см. Концентрации SiO_2 с глубиной увеличиваются от 14 до 21% (рис. 8, *a*).

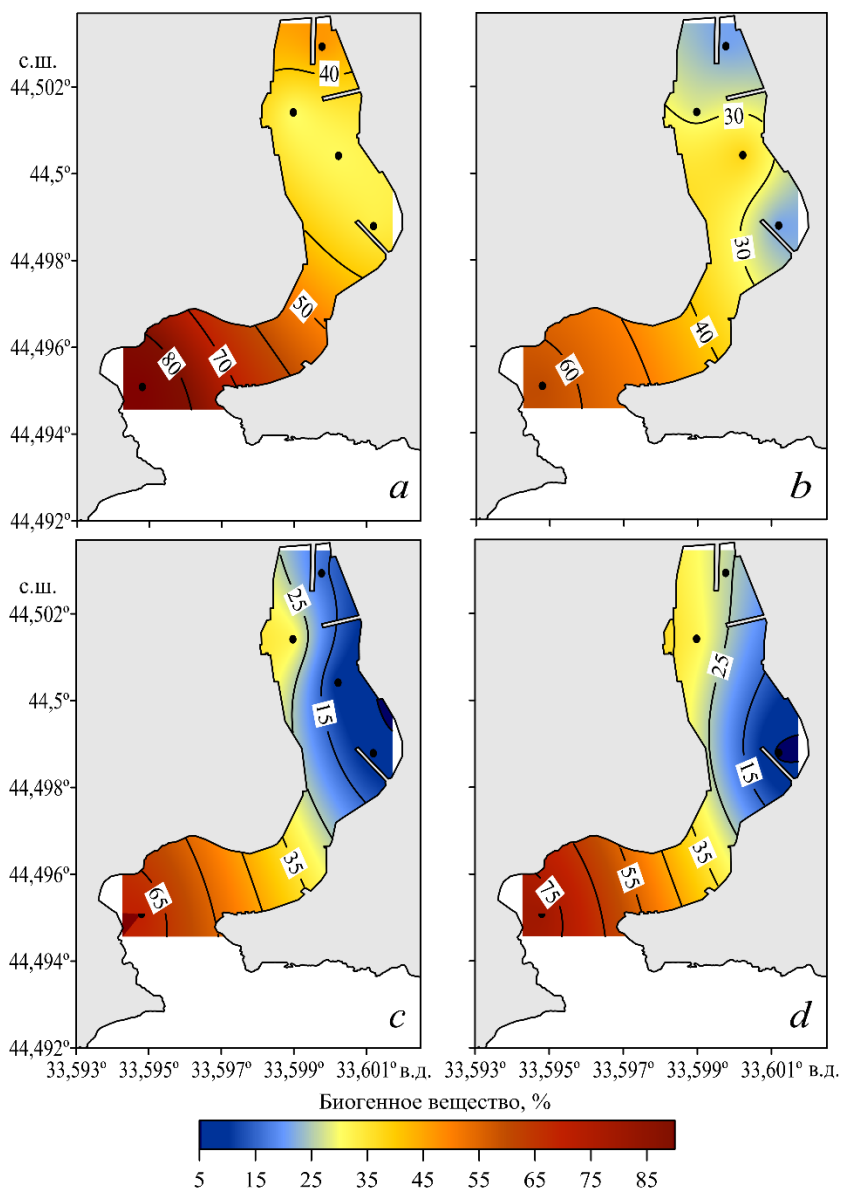


Рис. 7. Пространственное распределение биогенной составляющей донных отложений в слоях 0–5 см (*a*), 6–10 см (*b*), 11–15 см (*c*), 16–20 см (*d*)

Fig. 7. Spatial distribution of the biogenic fraction in bottom sediments in the layers 0–5 cm (*a*), 6–10 cm (*b*), 11–15 cm (*c*), 16–20 cm (*d*)

Согласно полученным результатам (рис. 8, *b*), наблюдается качественное и количественное соответствие величин биогенной составляющей донных отложений, полученных прямым ($C_{\text{орг}} + \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$) и косвенным (по данным о ^{40}K) методами для верхних слоев отложений. В нижерасположенных слоях донных отложений оценки, полученные косвенным методом, отличны от результатов прямых определений в среднем на $18 \pm 8\%$.

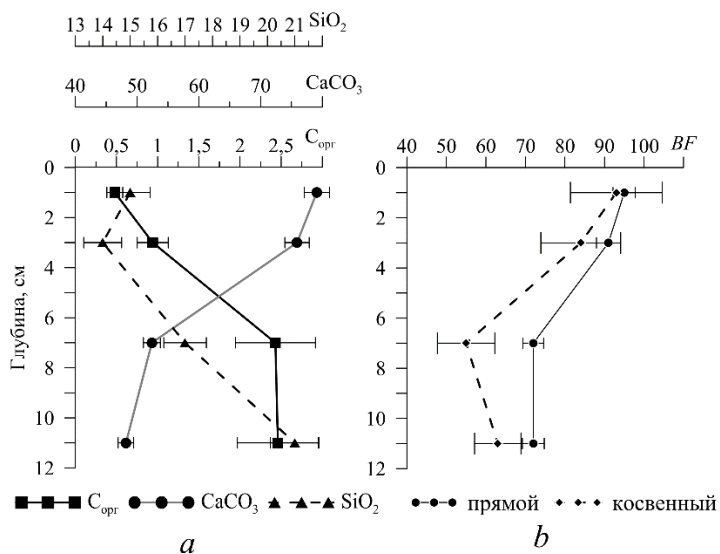


Рис. 8. Вертикальное распределение биогенной составляющей (%) донных отложений, рассчитанной прямым и косвенным методами

Fig. 8. Vertical distribution of the biogenic fraction (%) in bottom sediments calculated by the direct and indirect methods

Выводы

Согласно полученным результатам, концентрация ^{137}Cs и ^{40}K в верхнем 5-сантиметровом слое донных отложений изменялась по пространству в диапазоне 11–62 и 155–562 Бк/кг соответственно. Средние величины концентрации составили 43 ± 20 и 450 ± 172 Бк/кг для ^{137}Cs и ^{40}K соответственно. Максимальные величины концентрации радионуклидов были характерны для северной части бухты, минимальные – для южной. Такое пространственное распределение концентрации радионуклидов может быть обусловлено особенностями циркуляции вод в бухте, а также изменчивостью в поле концентрации взвешенного вещества. Отмечалась тенденция к росту величин концентрации радионуклидов с глубиной.

По данным о вертикальном распределении ^{137}Cs получены количественные оценки минимальной скорости осадконакопления в исследуемом районе, которая составила в среднем $0,50 \pm 0,06$ см/год.

Получены также количественные оценки доли биогенной составляющей в донных отложениях исследуемого района и показано, что она изменялась по пространству в диапазоне 30–89% и составляла в среднем $46 \pm 25\%$. Максимальные величины отмечались в южной части бухты, минимальные – в северной. Выполнено сопоставление величин биогенной составляющей, полученных прямым и косвенным методами, и показано их качественное и количественное соответствие в верхних слоях донных отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Органическое вещество и гранулометрический состав современных донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / Н. А. Орехова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 523–533. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-523-533

2. Орехова Н. А., Овсяный Е. И., Тихонова Е. А. Органическое вещество и окислительно-восстановительные условия в донных отложениях Балаклавской бухты // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2019. Т. 5, № 3. С. 49–64.
3. Овсяный Е. И., Котельянец Е. А., Орехова Н. А. Мышьяк и тяжелые металлы в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 4. С. 67–80.
4. Загрязняющие вещества в донных отложениях Балаклавской бухты (Черное море) / Е. А. Котельянец [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 469–480. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-469-480
5. Поле мутности и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты на основе гидрооптических методов наблюдений / П. Д. Ломакин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, Т. 1. С. 249–256.
6. Мирзоева Н. Ю., Гулин С. Б., Мирошниченко О. Н. Радионуклиды стронция и цезия // Система Черного моря / Отв. ред. академик РАН А. П. Лисицын. Москва : Научный мир, 2018. С. 605–624. doi:10.29006/978-5-91522-473-4.2018.605
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. <http://dx.doi.org/10.1080/02757549208055429>
8. Buesseler K. O., Livingston H. D. Time-Series Profiles of ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr 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. (NATO ASI Series (Series 2: Environment, vol. 27)). https://doi.org/10.1007/978-94-011-5758-2_19
9. Радиэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Г. Г. Поликарпов [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 666 с.
10. Evolution and fluxes of ¹³⁷Cs 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. Chiroşca [et al.] // Diversity in Coastal Marine Sciences. Coastal Research Library / Eds. C. Finkl, C. Makowski. Cham : Springer, 2018. Vol. 23. P. 221–232. 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. Москва : Научный мир, 2018. С. 659–670. doi:10.29006/978-5-91522-473-4.2018.659
13. Распределение ¹³⁷Cs в поверхностном слое Черного моря летом 2017 года / И. И. Довгий [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 166–175. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-166-175
14. The approaching obsolescence of ¹³⁷Cs 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 (¹³⁷Cs) / 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.
17. ⁴⁰K 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. Turekian K. K., Wedepohl K. H. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust // Geological Society of America Bulletin. 1961. Vol. 72. P. 175–192. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[175:DOTEIS\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTEIS]2.0.CO;2)

19. *Taylor S. R.* Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1964. Vol. 28, iss. 8. P. 1273–1285. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(64\)90129-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90129-2)
20. *Burnett W. C.* Trace Element Geochemistry of Biogenic Sediments from the Western Equatorial Pacific // *Pacific Science*. 1975. Vol. 29, iss. 2. P. 219–225. URL: <http://hdl.handle.net/10125/954> (date of access 20.02.2021).
21. Геохимия литогенеза в условиях сероводородного заражения (Черное море). Новосибирск : Наука, 1988. 194 с.
22. *Rudnick R. L., Gao S.* Composition of the Continental Crust // *The Crust: Treatise on Geochemistry* / Eds. R. L. Rudnick, H. D. Holland, K. K. Turekian. Oxford : Elsevier-Pergamum, 2003. Vol. 3. P. 1–64. <http://dx.doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
23. *Robert C. M.* Global Sedimentology of the Ocean: An Interplay between Geodynamics and Paleoenvironment. Amsterdam : Elsevier Science, 2008. 487 p. (Developments in Marine Geology, vol. 3).
24. Recent sedimentation in the Black Sea: New insights from radionuclide distributions and sulfur isotopes / M. Yücel [et al.] // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2012. Vol. 66. P. 103–113. doi:10.1016/j.dsr.2012.04.007
25. *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>
26. *Маркелов М. В., Голосов В. Н., Беляев В. Р.* Изменение скорости аккумуляции наносов на поймах малых рек в центре Русской равнины // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2012. № 5. С. 70–76.
27. *Smith H. G., Blake W. H.* Sediment fingerprinting in agricultural catchments: A critical re-examination of source discrimination and data corrections // *Geomorphology*. 2014. Vol. 204. P. 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.003>
28. The challenges and opportunities of addressing particle size effects in sediment source fingerprinting: A review. / J. P. Lacey [et al.] // *Earth-Science Reviews*. 2017. Vol. 169, iss. 2. P. 85–103. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.009>
29. *Фомин В. В., Ренетин Л. Н.* Численное моделирование ветровых течений и распространения примеси в Балаклавской бухте // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 4. С. 43–58.
30. *Sawhney B. L.* Selective Sorption and Fixation of Cations by Clay Minerals: A review // *Clays and Clay Minerals*. 1972. Vol. 20. P. 93–100. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1972.0200208>
31. *Comans R. N. J., Haller M., De Preter P.* Sorption of cesium on illite: Non-equilibrium behavior and reversibility // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. Vol. 55, iss. 2. P. 433–440. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90002-M](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90002-M)

Об авторах:

Кременчужский Дмитрий Александрович, научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-8747-6612**, d.kremenchutsky@gmail.com

Гуров Константин Игоревич, младший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **ResearcherID: L-7895-2017**, gurovki@gmail.com