

## ДИФФЕРЕНЦИРОВАННАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ $^{137}\text{Cs}$ НА БИОГЕННОМ И ЛИТОГЕННОМ ВЗВЕШЕННОМ ВЕЩЕСТВЕ В ЧЕРНОМ МОРЕ

© 2023 г. И. Г. Сидоров<sup>a</sup>, О. Н. Мирошниченко<sup>a</sup>, \*, В. Ю. Проскурнин<sup>a</sup>, А. А. Параскив<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр  
“Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН”,  
проспект Нахимова, д. 2, Севастополь, 299011 Россия

\*e-mail: oksaniya\_89@mail.ru

Поступила в редакцию 30.04.2022 г.

После доработки 20.10.2022 г.

Принята к публикации 07.11.2022 г.

Седиментационный транспорт  $^{137}\text{Cs}$  может приводить к накоплению этого радионуклида на глубинах, куда он не мог бы попасть в заметных количествах только за счёт вертикального водообмена, поэтому сравнительная оценка его содержания для различных типов взвеси и регионов Черного моря представляет особый интерес. В связи с этим, был осуществлен отбор проб взвешенного вещества (ВВ) и морской воды на глубоководных и прибрежных станциях для последующего определения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в поверхностном слое воды. Для расчета доли литогенного вещества дополнительно определяли содержание калия во взвеси. Диапазон содержания  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ для различных станций отличался более чем на порядок — для удельной активности от 7 до 111 Бк/кг, для содержания на взвеси в %, от общего содержания в поверхностном слое воды от 0.03 до 0.69%. Более удаленные от берега станции характеризовались наименьшим процентным содержанием  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ, тогда как на прибрежных эта величина была более вариабельной. Сопоставление вклада литогенного и биогенного вещества во взвеси и данных по  $^{137}\text{Cs}$  для различных станций говорит о том, что содержание этого радионуклида во ВВ определяется в первую очередь динамикой изменения содержания литогенной фракции. В отношении миграции  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ это приводит к наличию в Черном море как минимум двух регионов. Во-первых, это акватории, достаточно удаленные от источников литогенного вещества и в которых ВВ образуется в основном за счет деятельности живых организмов. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  на взвеси благодаря преобладанию биогенного вещества и незначительной концентрации литогенного в данном случае находится на уровне сотых долей процента от его общего содержания в поверхностном слое воды. Во-вторых, это прибрежные и шельфовые акватории, подверженные с одной стороны береговому и речному стоку значительных количеств литогенного вещества, с другой — характеризующиеся повышенной трофностью и биологической продуктивностью. В этих акваториях благодаря изменчивости биотических и абиотических факторов содержание  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ более вариабельно и может испытывать колебания от значений, характерных для открытого моря, до на порядок больших.

**Ключевые слова:** цезий-137, взвешенное вещество, Черное море

**DOI:** 10.31857/S001675252304012X, **EDN:** JXCYSM

### ВВЕДЕНИЕ

В морской среде  $^{137}\text{Cs}$  находится преимущественно в растворенной форме и обычно его содержание на взвешенном веществе (ВВ) невелико. Для Черного моря непосредственно после аварии на Чернобыльской АЭС наблюдалось довольно значительное содержание  $^{137}\text{Cs}$  на взвеси — до 3–6% от его общего содержания в поверхностном слое воды на станциях в западной части, что очевидно связано с первичными выпадениями на терригенных частицах (Никитин и др., 1988). Впоследствии такие высокие концентрации  $^{137}\text{Cs}$

в Черном море не наблюдались, и его активность на ВВ менялось в пределах от десятых до сотых долей % общего содержания.

Многолетние исследования динамики растворенной формы  $^{137}\text{Cs}$  в Черном море после аварии на Чернобыльской АЭС показывают закономерное снижение темпов уменьшения его активности в поверхностном слое и установление динамического равенства в слое 0–100 м между вторичным поступлением радионуклида, его радиоактивным распадом и удалением в нижележащие слои (Егоров и др., 1993; Gulin et al., 2015; Gulin et al., 2013). Верти-

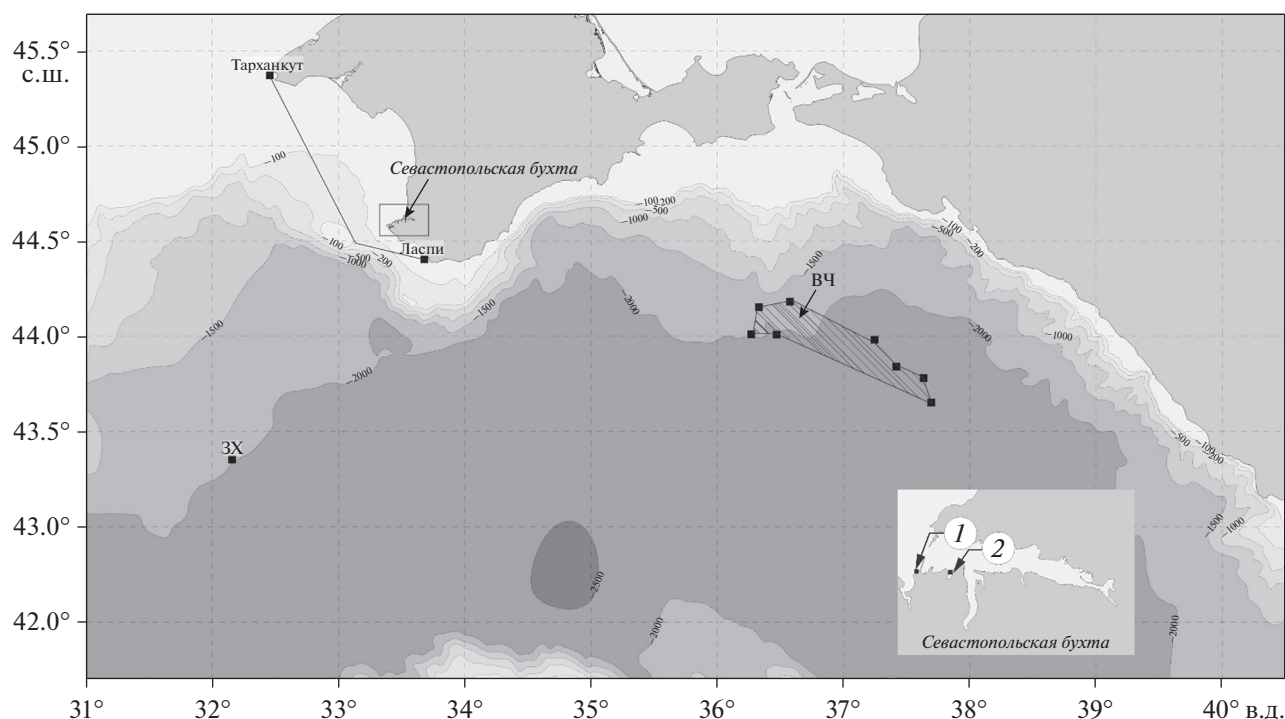


Рис. 1. Карта-схема отбора проб взвешенного вещества. 1 – бухта РБК; 2 – Артиллерийская бухта.

кальная миграция растворенной формы  $^{137}\text{Cs}$  происходит преимущественно в слое 0–100 м и, в меньшей степени, в слое 100–200 м, поток  $^{137}\text{Cs}$  через постоянный пикноклин в основном компенсируется его радиоактивным распадом (Егоров и др., 1993). Результаты мониторинга концентрации этого радионуклида показывают, что к 2000 г. его содержание в слое 0–100 м практически вышло на стационарный уровень благодаря установлению равновесия между процессами его поступления и удаления, при этом в слое 100–200 м содержание  $^{137}\text{Cs}$  продолжает увеличиваться за счёт удаления из вышележащего слоя (Гулин и др., 2017).

Таким образом, транспорт  $^{137}\text{Cs}$ , обусловленный вертикальным водообменом, обеспечивает его перераспределение главным образом для слоя 0–200 м. Иная картина наблюдалась для  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ. Так, уже в июне 1986 г. чернобыльский  $^{137}\text{Cs}$  был обнаружен в материале из седиментационной ловушки, установленной на глубине 1070 м (Buessel et al., 1990). Это говорит о том, что несмотря на незначительное содержание цезия на взвеси, седиментация может приводить к довольно высокой скорости переноса этого радионуклида на глубины, куда он не мог бы попасть в заметных количествах только за счет вертикального водообмена (Стокосов и др., 2008). В связи с этим, седиментационный транспорт обеспечивает небольшой, но стабильный поток депонирования  $^{137}\text{Cs}$  в донные отложения.

В заключение необходимо отметить, что, помимо указанных выше, в литературе практически отсутствуют работы по содержанию  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ в Черном море.

Исходя из вышеизложенного, представляет интерес изучение содержания  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ. Целью работы была общая сравнительная оценка содержания  $^{137}\text{Cs}$  для различных типов взвеси и регионов Черного моря.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Фильтрация морской воды на взвесь осуществлялась в 2015, 2016, 2017 и 2019 гг. в рейсах НИС “Профессор Водяницкий” ФИЦ ИнБЮМ и береговых экспедициях. Пробы морской воды на взвесь фильтровали по пути следования судна Тарханкут-Ласпи, непосредственно в бухте Ласпи, на Западной халистазе (ЗХ), в восточной части Черного моря (ВЧ), в бухтах Севастополя – Артиллерийской, бухте радиобиологического корпуса (РБК) ФИЦ ИнБЮМ. Карта-схема районов отбора проб представлена на рис. 1.

Для Западной халистазы и бухты РБК ФИЦ ИнБЮМ фильтрация проводилась дважды, в разные сезоны. На Западной халистазе – в апреле, декабре, в бухте РБК ФИЦ ИнБЮМ – в феврале, апреле. Объемы профильтрованной воды представлены в табл. 1. Отбор проб ВВ осуществляли с помощью тупиковой объемной фильтрации на полипропиленовых фильтрах с номинальным

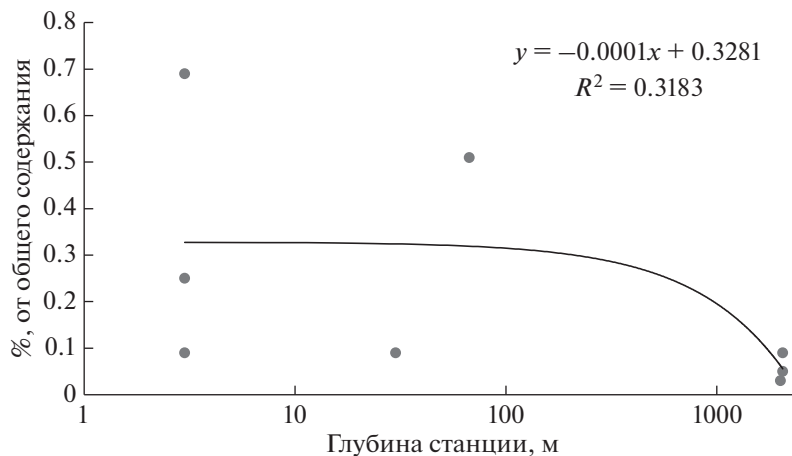
Таблица 1. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  на взвеси для различных районов Черного моря

Район	Концентрация взвеси, мг/л	Объем фильтрации, л	Активность $^{137}\text{Cs}$ на взвеси, Бк/кг	Активность $^{40}\text{K}$ на взвеси, Бк/кг	Активность растворенной формы $^{137}\text{Cs}$ , Бк/м <sup>3</sup>	Содержание $^{137}\text{Cs}$ на взвеси в %, от общего содержания	Доля литогенного вещества на взвеси, %
04.2017, Ласпи	0.67	5435	111 ± 11	662 ± 26	14.4 ± 0.7	0.51	85
04.2016 Тарханкут-Ласпи	0.53	22584	25.5 ± 3.1	499 ± 25	15.0 ± 0.7	0.09	60
04.2017, Западная халистаза	1.06	32117	7.1 ± 1.1	72 ± 8	15.0 ± 0.7	0.05	0
12.2017, Западная халистаза	0.53	6530	27.0 ± 3.2	591 ± 29	15.0 ± 0.7	0.09	74
12.2015, Восточная часть	0.42	24215	12.0 ± 1.8	372 ± 18	15.0 ± 0.7	0.03	40
02.2019, Севастополь, РБК	0.34	5721	33.0 ± 4.0	723 ± 22	12.5 ± 0.5	0.09	94
04.2019, Севастополь, РБК	1.5	7780	21.4 ± 2.6	336 ± 27	12.5 ± 0.5	0.25	36
05.2017, Севастополь, Артиллерийская бухта	1.2	3183	85 ± 9	558 ± 33	15.0 ± 0.7	0.69	69

размером пор 0.5 мкм. Для учёта величины проскока при фильтрации через полипропиленовые фильтры определяли концентрацию взвеси в исходной морской воде и в фильтрате. Общую массу отфильтрованного сухого ВВ определяли исходя из разности концентраций взвеси на входе и выходе из фильтрационной установки и общего объема профильтрованной воды. Величина проскока проточной фильтрации не превышала 5%. После фильтрации полипропиленовые фильтры высушивали на воздухе и озоляли в муфельной печи с доступом кислорода при температуре 330°C. Полученную золу помещали на измерение на гамма-спектрометр 1282 CompuGamma CS (LKB Wallac, Финляндия). Данный гамма-спектрометр выполнен на основе кристалла NaI(Tl) колодезного типа, что обеспечивает геометрию счёта, наиболее приближенную к 4π, с диапазоном энергий от 10 кэВ до 2 МэВ. Определение активности  $^{137}\text{Cs}$  было осуществлено по гамма-излучению его дочернего радионуклида  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  с энергией 661.6 кэВ, природного  $^{40}\text{K}$  – по его гамма-излучению с энергией 1460.8 кэВ, с учетом радиоактивного фона и эффективности регистрации для  $^{137}\text{Cs}$  – 11%,  $^{40}\text{K}$  – 1%. Дополнительно по той же процедуре проводили холостые измерения золы полипропиленового фильтра, который не использовался для фильтрации. Уровни активности в этом случае не превышали фоновые значения.

Концентрацию общего взвешенного вещества в морской воде определяли весовым методом путём вакуумной фильтрации через мембранные фильтры из нитроцеллюлозного волокна с диаметром пор 0.45 мкм, которые затем промывали дистиллированной водой для удаления солей. После прогрева при 60°C в сушильном шкафу, осуществлялось взвешивание мембранных фильтров (до и после фильтрации) на аналитических весах с погрешностью  $1 \times 10^{-4}$  г. Относительная погрешность определения концентрации общего ВВ не превышала 5%.

Доля биогенного и литогенного вещества определялась по разработанной нами ранее методике с использованием  $^{40}\text{K}$  (Gulin et al., 2014). Калий представляет довольно распространенный в земной коре элемент (7-й по распространенности) со средним содержанием калия около 25 г/кг (Виноградов, 1962). Кларк калия в живом веществе значительно ниже – около 3 г/кг (Иванов, 1994; Перельман, 1972). При этом для карбонатов – основного материала биогенной седиментации в Черном море (Митропольский и др., 1982), содержание калия составляет 2.7–2.9 г/кг (Turekian, Wedepohl, 1961) и, наконец, определенные непосредственно для осадочного материала Черного моря значения для биогенного и литогенного вещества составляли 2–3 и 25 г/кг соответственно (Гавшин и др., 1988).



**Рис. 2.** Содержание  $^{137}\text{Cs}$  на взвеси в процентах от общего содержания радионуклида в поверхностном слое воды в зависимости от глубины станции.

Определив фактическое содержание калия в донных осадках в граммах калия на килограмм (г/кг), можно рассчитать относительный вклад биогенного материала в процентах от общей массы осадка или ВВ, используя балансовое уравнение:

$$B = \frac{Clk_L - K}{Clk_L - Clk_B} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $Clk_L$  и  $Clk_B$  – значения кларков калия в литогенном и биогенном веществе, соответственно, 25 и 3 г/кг,  $K$  – фактическое содержание калия в исследуемой пробе, г/кг, определенное по результатам радиометрических измерений активности калия-40. Для определения содержания калия по активности его изотопа  $^{40}\text{K}$  использовали величину удельной радиоактивности, равную 1 г калия = 30.65 Бк  $^{40}\text{K}$ .

Доля литогенного вещества, в процентах от общей массы осадка или ВВ,  $L$ , рассчитывалась на основе  $B$  как

$$L = 100 - B. \quad (2)$$

Для каждой станции содержание  $^{137}\text{Cs}$  на взвеси в процентах от общего содержания этого радионуклида в поверхностном слое воды рассчитывалось следующим образом. Используя значения концентрации взвеси, мг/л и удельной активности цезия на взвеси, Бк/кг, рассчитывали активность цезия на ВВ в  $\text{м}^3$ , Бк/ $\text{м}^3$ . Общее содержание цезия в объеме воды 1  $\text{м}^3$  принимали равным сумме активности его растворенной формы (в Бк) и его активности на ВВ (в Бк). Затем, зная общее содержание цезия в 1  $\text{м}^3$  воды, рассчитывали какая его часть, в %, приходится на ВВ.

Для определения растворенной формы  $^{137}\text{Cs}$  в пробах поверхностной морской воды был использован метод, основанный на его концентрировании с помощью проточной сорбции в двух по-

следовательно соединенных адсорберах, импрегнированных смешанным ферроцианидом никеля-калия ( $\text{K}_{1,33}\text{Ni}_{1,33}[\text{Fe}(\text{CN})_4]$ ) с последующим измерением содержания  $^{137}\text{Cs}$  по гамма-излучению на NaI(Tl) гамма-спектрометре 1282 CompuGamma CS (Miroshnichenko et al., 2019). Эффективность сорбции определяли по разнице активностей  $^{137}\text{Cs}$  в первом и втором адсорберах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ менялась в пределах от 7 до 111 Бк/кг, его содержание на взвеси в % от общего содержания в поверхностном слое также могло на различных станциях отличаться почти на порядок – от 0.03 до 0.69% (табл. 1). Наибольшая удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ была обнаружена на станциях около Ласпи (111 Бк/кг) и в Артиллерийской бухте Севастополя (85 Бк/кг), на этих же станциях было наибольшим процентное содержание  $^{137}\text{Cs}$  на взвеси – 0.51 и 0.69% соответственно (табл. 1).

Активность растворенной формы  $^{137}\text{Cs}$ , напротив, была распределена довольно равномерно – от 12.5 до 15 Бк/ $\text{м}^3$  (табл. 1).

На рис. 2 представлено содержание  $^{137}\text{Cs}$  на взвеси в процентах от общего содержания этого радионуклида в поверхностном слое воды в зависимости от глубины станции. Ось глубин представлена в логарифмическом масштабе. Более удаленные от берега станции характеризовались наименьшей долей  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ, тогда как на прибрежных эта величина была более вариабельной.

Рассчитанное на основе  $^{40}\text{K}$  процентное содержание литогенного вещества (табл. 1) было максимальным на станции Ласпи в апреле и РБК в феврале, а также, несмотря на удаленность стан-

ции от берега, на Западной халистазе в декабре. При этом в апреле на той же станции у Западной халистазы взвешенное вещество было исключительно биогенным. Также значительную долю составляло литогенное вещество на станции в Артиллерийской бухте — 69%.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Информация, представленная в литературе по конкретным деталям геохимического поведения цезия в природных водах довольно противоречива — см. подробное рассмотрение вопроса в (Касаткина, 2008; Lammers et al., 2017). Тем не менее, в целом общие закономерности миграции и перераспределения  $^{137}\text{Cs}$  связаны с химическим и гранулометрическим составом взвешенного вещества и донных отложений, а также с составом морской воды. Известно, что  $^{137}\text{Cs}$  в большей степени накапливается на мелкозернистом литогенном веществе, что связано с присутствием в нем глинистых минералов (Comans et al., 1991; Gulin et al., 2001; Sawhney, 1972; Матишов, 2001; Duursma, 1996; Дунаева, Мироненко, 2000). Их сорбционные свойства могут существенно отличаться (Sawhney, 1972), но считается, что в процессе накопления цезия морскими донными отложениями определяющую роль играет глинистый минерал иллит (Aston et al., 1973; Cremers et al. 1988; Fuller et al., 2015). Вместе с тем отмечается, что зависимость сорбции цезия от содержания иллита может носить более сложный характер и значимая корреляция установлена также с содержанием в осадке других минералов, в том числе даже таких как кварц и кальцит (Duursma, 1996).

Существенное влияние на поведение  $^{137}\text{Cs}$  в водной среде оказывает наличие его химического аналога, широко распространенного в природе, калия (Livingston, 1988; Fuller et al., 2015). В связи с этим, в пресных водоемах  $^{137}\text{Cs}$  более активно накапливается взвесью и выводится в донные отложения, чем в морских, где он находится в основном в растворенной форме в виде простого иона (Polikarpov et al., 1991). Более сложная ситуация наблюдается в таких областях, как, например, приустьевые акватории, где пресная речная вода смешивается с морской и происходит перенос цезия с твердым речным стоком в море. При этом, в условиях с более высокой соленостью, возможен переход сорбированного на речной взвеси  $^{137}\text{Cs}$  в растворенное состояние (Gulin et al., 2013; Durgant et al., 2018).

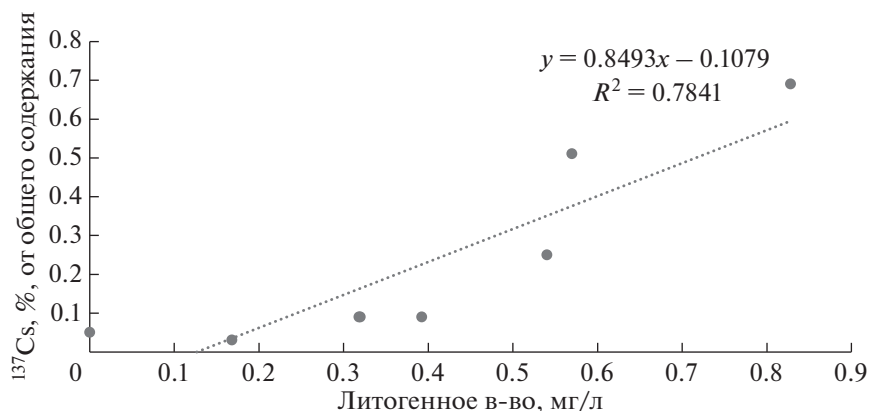
В отношении этих факторов прибрежные регионы, как правило более вариабельны, чем глубоководные. Станции в Севастопольской бухте подвержены влиянию городских ливневых стоков в районе Артиллерийской бухты и взмучиванию поверхностного слоя донных отложений в

штормовую погоду. Такие условия обеспечивают широкий диапазон изменчивости состава взвеси, а также изменение солености воды за счет городских ливневых стоков. Поэтому на рис. 2 наибольший разброс значений содержания  $^{137}\text{Cs}$  мы наблюдаем для прибрежных станций в Севастопольской бухте, в отличие от глубоководных станций, где процентное содержание  $^{137}\text{Cs}$  на взвеси менялось от 0.03 до 0.09%. Низкий уровень достоверности для линии тренда связан с указанной высокой изменчивостью содержания  $^{137}\text{Cs}$  на прибрежных станциях и, очевидно, в связи с этим достоверность аппроксимации любой функциональной зависимостью будет довольно низкой. Такой уровень достоверности аппроксимации является дополнительной иллюстрацией разницы геохимических условий, которые оказывают влияние на содержание  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ, в прибрежных и глубоководных акваториях моря — более изменчивых в прибрежных и относительно стабильных в глубоководных.

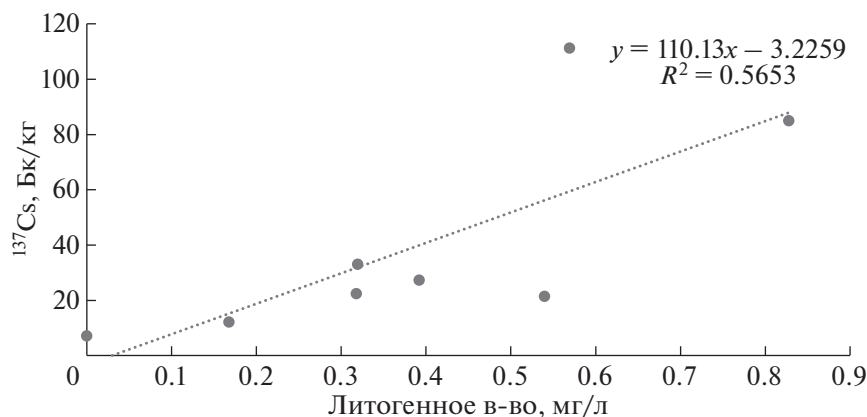
Полноценное определение генезиса взвеси в общем случае представляет собой довольно сложную задачу и основано на использовании различных маркеров, в первую очередь таких, как содержание  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}$  по отношению к общей массе вещества (Гавшин и др., 1988; Brumsack, 2006; Hay et al., 1991; Martinez et al., 2007). Поскольку в цели статьи не вошла детальная и точная типология компонентов ВВ, для определения относительного содержания литогенной и биогенной составляющей нами был использован более простой метод по  $^{40}\text{K}$ , который является природным радионуклидом литогенного происхождения. Он уже был с успехом применен для определения вклада биогенной составляющей в процесс накопления донных отложений во всем диапазоне глубин Черного моря (Gulin et al., 2014), а также при изучении биогенного осадконакопления в Севастопольской бухте на сезонном масштабе времени с параллельным определением уровня первичной продукции по радиоуглеродному методу и общего потока вещества по короткоживущему  $^{234}\text{Th}$  (Гулин и др, 2019).

На основе рассчитанного по  $^{40}\text{K}$  вклада литогенной составляющей и концентрации общего взвешенного вещества была определена концентрация литогенного вещества для каждой станции. На рис. 3, 4 представлено процентное содержание  $^{137}\text{Cs}$  на общей взвеси и его удельная активность, в беккерелях на килограмм массы общей взвеси, в зависимости от концентрации литогенной компоненты взвешенного вещества, мг/л.

В связи с тем, что содержание  $^{137}\text{Cs}$ , как растворенной его формы, так и на ВВ в Черном море невелико, по-видимому, более корректно аппроксимировать представленные на рис. 3 и рис. 4 данные линейной зависимостью. Видно, что определяющим



**Рис. 3.** Содержание  $^{137}\text{Cs}$  на общем взвешенном веществе в процентах от суммарного содержания радионуклида в поверхностном слое воды в зависимости от концентрации литогенной фракции взвешенного вещества.



**Рис. 4.** Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в Бк на кг общего взвешенного вещества в зависимости от концентрации его литогенной фракции.

фактором содержания  $^{137}\text{Cs}$  на взвеси является изменение концентрации литогенного вещества, что вполне согласуется с современными представлениями о механизмах сорбции этого радионуклида в природных средах (Comans et al., 1991; Gulin et al., 2001; Sawhney, 1972). Более высокая степень достоверности аппроксимации для процентного содержания  $^{137}\text{Cs}$  связана с тем, что эта величина учитывает вариабельность концентрации взвеси на различных станциях, в отличие от удельной активности. Например, для Западной халистазы в апреле и декабре 2017 г. активность  $^{137}\text{Cs}$  отличалась почти в четыре раза – 7.1 и 27 Бк/кг, в то время как процентное содержание – фактически менее, чем в два раза (0.05 и 0.09%) из-за меньшей концентрации взвешенного вещества в декабре. Высокое процентное содержание литогенного вещества при низкой концентрации суммарной взвеси в декабре на Западной халистазе, по-видимому, было связано с его эоловым переносом в период зимних штормов.

Наибольшая активность на ВВ и процентное содержание  $^{137}\text{Cs}$  было обнаружено в районе бухт Ласпи и Артиллерийской. В первом случае это можно связать с геологическим строением данного региона (Снегирева, 1969) и поступлением глинистых частиц за счет береговой абразии. По берегам Артиллерийской бухты расположена плотно застроенная городская набережная, благодаря смыву с ливневой канализацией литогенная взвесь поступает в бухту – известно, что используемые для строительства облицовочные и бутовые камни часто изготавливаются из гранитов и, менее прочных и более подверженных выветриванию, сиенитов (Козловский, 1991).

Активность  $^{137}\text{Cs}$  на взвешенном веществе Западной халистазы в апреле 2017 г. составляла 7.1 Бк/кг, при содержании калия 2.3 г/кг. Известно, что содержание калия в биогенном веществе в Черном море не превышает 3 г/кг (Гавшин и др., 1988) и, таким образом, в данном случае взвесь была полностью образована биогенной фракци-

**Таблица 2.** Коэффициенты накопления

Район	Коэффициент накопления	Доля биогенного вещества
04.2017, Ласпи	$8 \times 10^3$	0.15
04.2016 Тарханкут-Ласпи	$2 \times 10^3$	0.40
04.2017, Западная халистаза	$5 \times 10^2$	1
12.2017, Западная халистаза	$2 \times 10^3$	0.26
12.2015, Восточная часть	$8 \times 10^2$	0.6
02.2019, Севастополь, РБК	$3 \times 10^3$	0.06
04.2019, Севастополь, РБК	$2 \times 10^3$	0.64
05.2017, Севастополь, Артиллерийская бухта	$6 \times 10^3$	0.31

ей. Органические компоненты биогенного ВВ в большинстве своем имеют неполярную природу и вещества, которые находятся в ионной форме, такие как цезий, в меньшей степени накапливаются ими (Duursma, 1996; Lujaniene, 2003). Покрытые органическими пленками литогенные глинистые минералы также значительно снижают свою сорбционную активность (Dumat, 1999; Kim et al., 2006). Коэффициент накопления  $^{137}\text{Cs}$  для биогенного вещества, рассчитанный по этим данным составил  $5 \times 10^2$ , что совпадает с аналогичными данными для морских организмов, а также акваторий с высокой биопродуктивностью и значительным вкладом биогенного вещества в общую массу ВВ (Егоров и др., 2013; IAEA, 1985; Sidorov et al., 2022). По порядку величины такой же коэффициент накопления был определен для взвеси в восточной части Черного моря, для остальных станций он был равен  $n \times 10^3$  (с наибольшим значением  $8 \times 10^3$  для бухты Ласпи), что соответствует коэффициенту накопления  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях (Егоров и др., 2013; IAEA, 1985) (табл.2).

Таким образом, различные акватории Черного моря характеризуются разным, отличающимся примерно на порядок содержанием  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ, что обусловлено различиями в типе взвеси. Если сопоставить станции, наиболее сходные по концентрации общего взвешенного вещества и одновременно наиболее различные по доле литогенного вещества – Артиллерийскую бухту и Западную халистазу в апреле (табл. 1), то удельная активность и процентное содержание  $^{137}\text{Cs}$  на взвеси будет также относиться на этих станциях примерно как 10 к 1. Такое различие будет, очевидно, приводить к существенной зависимости переноса  $^{137}\text{Cs}$  на взвешенном веществе от региональных факторов, определяющих вклад его биогенной и литогенной составляющей – динамикой фитопланктонных сообществ, климатических изменений, влияющих на поступление в прибрежные районы литогенного вещества и других.

## ВЫВОДЫ

Содержание  $^{137}\text{Cs}$  на взвеси в Черном море в целом контролируется динамикой литогенной фракции взвешенного вещества, при этом на биогенном веществе цезия на порядок меньше – как по удельной активности, так и по процентному содержанию. Это обеспечивает естественное разделение Черного моря в отношении миграции  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ как минимум на два типа регионов. Во-первых, это акватории, достаточно удаленные от источников литогенного вещества и в которых ВВ образуется в основном за счет деятельности живых организмов – такие как Западная халистаза и восточная часть Черного моря. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  на взвеси благодаря преобладанию биогенного вещества и незначительной концентрации литогенного в данном случае находится на уровне сотых долей процента от его общего содержания в поверхностном слое воды. Во-вторых, это прибрежные и шельфовые акватории Черного моря – зона северо-западного шельфа и западное побережье Крыма, а также Севастопольская бухта, подверженные с одной стороны береговому и речному стоку значительных количеств литогенного вещества, с другой – характеризуются повышенной трофностью и биологической продуктивностью. В этих акваториях благодаря изменчивости биотических и абиотических факторов содержание  $^{137}\text{Cs}$  на ВВ более вариабельно и может испытывать колебания от значений, характерных для открытого моря до на порядок больших.

*Исследования выполнены по результатам 82, 84, 93, 99, 100 рейсов НИС “Профессор Водяницкий” (Центр коллективного пользования “НИС Профессор Водяницкий” Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра “Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН”).*

*Работа подготовлена в рамках темы государственного задания ФИЦ ИнБЮМ “Молисмологиче-*

ские и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем”, номер государственной регистрации 121031500515-8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов А.П. (1962) Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. *Геохимия*. (7), 555-571.
- Гавшин В.М., Лапухов С.В., Сараев С.В. (1988) Геохимия литогенеза в условиях сероводородного заражения (Черное море). Новосибирск: Наука, 194 с.
- Гулин С.Б., Егоров В.Н., Мирзоева Н.Ю., Проскурнин В.Ю., Бей О.Н., Сидоров И.Г. (2017) Радиоемкость кислородной и сероводородной зон Черного моря в отношении  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . *Радиационная биология. Радиозэкология*. **57**(2), 191-200.
- Гулин С.Б., Сидоров И.Г., Поповичев В.Н. (2019) Сезонная динамика биоседиментации и первичной продукции в Севастопольской бухте: оценка взаимосвязи с использованием  $^{234}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ . *Биология моря*. **45**, 171-176.
- Дунаева А.Н., Мироненко М.В. (2000) Сорбция цезия некоторыми глинистыми минералами. *Геохимия*. (2), 213-221
- Егоров В.Н., Гулин С.Б., Поповичев В.Н., Костова С.К., Гулина Л.В., Малахова Л.В., Малахова Т.В., Плотицына О.В., Мирзоева Н.Ю., Терещенко Н.Н., Лазоренко Г.Е., Проскурнин В.Ю., Сидоров И.Г., Стецок А.П., Марченко Ю.Г. (2013) Биогеохимические механизмы формирования критических зон в отношении загрязняющих веществ в Черном море. *Морской экологический журнал*. **12**(4), 5-26.
- Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Кулебакина Л.Г., Стокозов Н.А., Евтушенко Д.Б. (1993) Модель крупномасштабного загрязнения Черного моря долгоживущими радионуклидами цезием-137 и стронцием-90 в результате аварии на ЧАЭС. *Водные ресурсы*. **20**(3), 326-330.
- Иванов В.В. (1994) *Книга 1: s-элементы. Экологическая геохимия элементов: Справочник: в 6 кн.* (Под ред. Э. К. Буренкова). М.: Недра, 304 с.
- Касаткина, Н.Е., (2008) Адсорбция радионуклидов цезия на донных отложениях и оценка радиозэкологической ситуации в бассейнах Баренцева и Азовского морей (дис. канд. хим. наук: 03.00.16). Иваново.
- Козловский Е.А. (1991) Горная энциклопедия. Т. 1–5. М.: Советская энциклопедия, 541 с.
- Матишов Д.Г. (2001) Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 417 с.
- Митропольский А.Ю., Безбородов А.А., Овсяный Е.И. (1982) Геохимия Черного моря. К.: Наукова думка, 144 с.
- Никитин А.И., Мединец В.И., Чумичев В.Б., Катрич И.Ю., Вакуловский С.М., Козлов А.И., Лепешкин В.И. (1988) Радиоактивное загрязнение Черного моря вследствие аварии на ЧАЭС по состоянию на октябрь 1986 г. *Атомная энергия*. **65**(2), 134-137.
- Перельман А.И. (1972) Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 424 с.
- Снегирева О.В. (1969) Юрская система, Средний отдел. *Геология СССР. Т. 8. Крым. Часть 1. Геологическое описание* (Под ред. М.В. Муратова). М.: Недра, 99-114.
- Стокозов Н.А., Гулин С.Б., Мирзоева Н.Ю. (2008) Содержание  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  на взвешенном веществе и в донных отложениях Черного моря после аварии на Чернобыльской АЭС. *Радиозэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию* (Под ред. Г.Г. Поликарпова и В.Н. Егорова). Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 519-547.
- Aston S.R., Duursma E.K. (1973) Concentration effects on  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{106}\text{Ru}$  sorption by marine sediments with geochemical implications. *Netherlands J. Sea Research*. **6**(1–2), 225-240.
- Brumsack H.-J. (2006) The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: implications for Cretaceous black shale formation. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **232**(2–4), 344-361
- Buesseler K.O., Livingston H.D., Honjo S., Hay B.J., Konuk T., Kempe S. (1990) Scavenging and particle deposition in the southern Black Sea – evidence from Chernobyl radiotracers. *Deep-Sea Res.* **37**(3), 413-430.
- Comans R.N., Haller M., Preter P.D. (1991) Sorption of cesium on illite: Nonequilibrium behavior and reversibility. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **55**(2), 433-440.
- Cremers A., Elsen A., Preter P.De, Maes A. (1988) Quantitative analysis of radiocaesium retention in soils. *Nature*. **335**(6187), 247-336.
- Dumat C. (1999) Reduced adsorption of caesium on clay minerals caused by various humic substances. *J. Environ. Radioact.* **46**, 187-195
- Durrant C.B., Begg J.D., Kersting A.B., Zavarin M. (2018) Cesium sorption reversibility and kinetics on illite, montmorillonite, and kaolinite. *Sci. Total Environ.* **610**, 511-520.
- Duursma E.K. (1996) *Environmental compartments: equilibria and assessment of processes between air, water, sediments and biota*. E.K. Duursma, J. Carroll. Berlin: Springer, 280 p.
- Fuller A.J., Shaw S., Ward M.B., Haigh S.J., Mosselmans J.F.W., Peacock C.L., Stackhouse, S., Dent A.J., Trivedi D., Burke I.T. (2015) Caesium incorporation and retention in illite interlayers. *Appl. Clay Sci.* **108**, 128-134.
- Gulin S.B., Egorov V.N., Duka M.S., Sidorov I.G., Proskurnin V.Yu., Mirzoyeva N.Yu., Bey O.N., Gulina L.V. (2015) Deep-water profiling of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the Black Sea. A further insight into dynamics of the post-Chernobyl radioactive contamination. *J. Radioanal. Nucl. Ch.* **304**(2), 779-783.
- Gulin S.B., Mirzoyeva N.Yu., Egorov V.N., Polikarpov G.G., Sidorov I.G., Proskurnin V.Yu. (2013) Secondary radioactive contamination of the Black Sea after Chernobyl accident: recent levels, pathways and trends. *J. Environ. Radioact.* **124**, 50-56.
- Gulin S.B., Gulina L.V., Sidorov I.G., Proskurnin V.Yu., Duka M.S., Moseichenko I.N., Rodina E.A. (2014)  $^{40}\text{K}$  in the Black Sea: a proxy to estimate biogenic sedimentation. *J. Environ. Radioact.* **134**, 21-26.
- Gulin S.B., Polikarpov G.G., Egorov V.N., Korotkov A.A., Stokozov N.A., Martin J.M. (2001) Radioactive contami-



- nation of the north-western Black Sea sediments. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **54**(3), 541-549.
- Hay B.J., Arthur M.A., Dean W.E., Neff E.D., Honjo S. (1991) Sediment deposition in the Late Holocene abyssal Black Sea with climatic and chronological implications. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. **38**(suppl. 2), 1211-1236.
- International Atomic Energy Agency (1985) *Sediment  $K_d$ S and Concentration Factors for Radionuclides in the Marine Environment. Technical Report Series. (247)*. IAEA, 74 p.
- Kim Y., Cho S., Kang H.-D., Kim W., Lee H.-R., Doh S.-H., Kim K., Yun S.-G., Kim D.-S., Jeong G.Y. (2006) Radiocesium reaction with illite and organic matter in marine sediment. *Mar. Pollut. Bull.* **52**(6), 659-665.
- Lammers L.N., Bourg I.C., Okumura M., Kolluri K., Sposito G., Machida M. (2017) Molecular dynamics simulations of cesium adsorption on illite nanoparticles. *J. Colloid and Interface Science.* **490**, 608-620.
- Livingston H.D. (1988) The use of Cs and Sr isotopes as tracers in the Arctic Mediterranean Seas. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences.* **325**(1583), 161-176.
- Lujanienė G., Vilimaitė-Šilobritienė B., Jokšas K. (2003) Effect of coatings on caesium sorption-desorption behavior in bottom sediments. *Environmental and Chemical Physics.* **25**(3), 129-135.
- Martinez N.C., Murray R.W., Thunell R.C., Peterson L.C., Muller-Karger F., Astor Y., Varela R. (2007) Modern climate forcing of terrigenous deposition in the tropics (Caribbean Basin, Venezuela). *Earth Planet. Sci. Lett.* **264**(3-4), 438-451.
- Miroshnichenko O.N., Paraskiv A.A., Gulin S.B. (2019) Cesium-137 Concentration in the Surface Waters of Eurasian Seas: Evidence from the Expedition Research of 2017. *Geochem. Int.* **57**(12), 1349-1354.
- Polikarpov G.G., Kulebakina L.G., Timoshchuk V.I., Stokozov N.A. (1991)  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in surface waters of the Dnepr River, the Black Sea and the Aegean Sea in 1987 and 1988. *J. Environ. Radioact.* **13**(1), 25-28.
- Sawhney B.L. (1972) Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: A review. *Clays and Clay Minerals.* **20**(2), 93-100.
- Sidorov I.G., Tereshchenko N.N., Korotkov A.A., Chuzhikova-Proskurnina O.D., Hiep N.T., Trapeznikov A.V. (2022)  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{210}\text{Po}$  in abiotic components of aquatic ecosystems two rivers in the Can Gio biosphere reserve, Vietnam. *Nuclear Engineering and Technology*. (Available online 6 July 2022)  
<https://doi.org/10.1016/j.net.2022.07.005>
- Turekian K.K., Wedepohl K.H. (1961) Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Geol. Soc. Am. Bull.* **72**(2), 175-192.