

Распределение ^{137}Cs в поверхностном слое Черного моря летом 2017 года

И. И. Довгий¹*, Д. А. Кременчуцкий¹, Н. А. Бежин¹,
О. Н. Козловская¹, В. В. Милютин², Е. А. Козлитин²

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

²Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: dovhyi.illarion@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.09.2019 г., после доработки – 14.01.2020 г.

Цель. Целью настоящего исследования является изучение распределения ^{137}Cs в прибрежной и глубоководной частях Черного моря. Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие научные задачи: выбор метода концентрирования ^{137}Cs из проб морской воды, проведение отбора проб морской воды и концентрирование ^{137}Cs , проведение измерений полученных проб, обсуждение полученных результатов и их соотнесение с имеющимися литературными данными.

Методы и результаты. В работе исследовано распределение ^{137}Cs в прибрежной и глубоководной частях Черного моря. Представлены данные натуральных наблюдений пространственно-временной изменчивости поля активности ^{137}Cs в поверхностном слое вод Черного моря, полученные в ходе 95-го рейса научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» (14 июня – 7 июля 2017 г.). На ряде станций были также получены данные о вертикальном распределении этого радионуклида в деятельном слое моря. Было отобрано и обработано 22 пробы морской воды на 11 станциях. Для извлечения ^{137}Cs из морской воды впервые использован ферроцианидный сорбент марки ФСС, разработанный для селективного извлечения радионуклидов цезия (^{134}Cs , ^{137}Cs) из технологических растворов и радиоактивных сточных вод.

Выводы. Согласно полученным результатам, активность ^{137}Cs изменялась по пространству в диапазоне 5,7–8,8 Бк/м³ и составляла в среднем $6,9 \pm 0,2$ Бк/м³. Вертикальное распределение ^{137}Cs в пределах деятельного слоя моря однородное.

Ключевые слова: ^{137}Cs , Черное море, деятельный слой, пространственно-временная изменчивость, селективный сорбент.

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания № 0827-2020-0003 «Океанологические процессы», методические аспекты сорбции изучены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60007 (конкурс «Перспектива»).

Для цитирования: Распределение ^{137}Cs 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

Distribution of ^{137}Cs in the Surface Layer of the Black Sea in Summer, 2017

I. I. Dovhyi^{1,*}, D. A. Kremenchutskii¹, N. A. Bezhin¹,
O. N. Kozlovskaia¹, V. V. Milyutin², E. A. Kozlitin²

¹Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

²Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

*e-mail: dovhyi.illarion@yandex.ru

Purpose. The purpose of the study is to investigate distribution of ^{137}Cs in the coastal and deep-water part of the Black Sea. To achieve this goal, the following scientific problems has to be solved: choosing a method for concentrating ^{137}Cs from seawater samples, seawater sampling and ^{137}Cs concentrating, measurements of the obtained samples, discussion of the obtained results and their comparison with the available scientific literature data.

Materials and Results. Distribution of ^{137}Cs activity in the coastal and deep-water part of the Black Sea was studied. The in situ data on spatial-temporal variability of the ^{137}Cs volumetric activity field in the Black Sea surface layer obtained in course of the 95th cruise of the R/V "Professor Vodyanitsky" in June, 14–July 7, 2017 were used. The data on the radionuclide vertical distribution in the sea active layer were obtained at a number of stations. 22 seawater samples were taken and processed at 11 stations. To separate ^{137}Cs from seawater, a ferrocyanide sorbent of the FCC brand was first applied; it was intentionally developed for selective recovery and separation of ^{134}Cs and ^{137}Cs radionuclides from the technological processing solutions and radioactive waste water.

Conclusions. According to the results, the volumetric activity of ^{137}Cs varied spatially in the range 5.7–8.8 Bq/m³ and amounted on average 6.9 ± 0.2 Bq/m³. Within the active layer boundaries, vertical distribution of ^{137}Cs was found to be uniform.

Keywords: ^{137}Cs , volumetric activity analysis, Black Sea, active layer, spatial-temporal variability, sorption, selective sorbent.

Acknowledgments: the study was carried out within the framework of the state task No. 0827-2020-0003 "Oceanological processes", methodological aspects of sorption were studied at the RFBR financial support within the framework of scientific project No. 19-33-60007.

For citation: Dovhyi, I.I., Kremenchutskii, D.A., Bezhin, N.A., Kozlovskaia, O.N., Milyutin, V.V. and Kozlitin, E.A., 2020. Distribution of ^{137}Cs in the Surface Layer of the Black Sea in summer, 2017. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(2), pp. 152-160. doi:10.22449/1573-160X-2020-2-152-160

Введение

Распределение ^{137}Cs после аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) изучалось во многих морских экспедициях. Основные работы в этой области на протяжении 30 лет и до настоящего времени выполняются в Институте биологии южных морей, результаты этих работ опубликованы в ряде монографий [1–3] и большом количестве научных статей [4–6]. Значительный вклад в изучение вопроса внесли американские исследователи в ходе экспедиций на НИС *K. Piri Reis* (сентябрь 1986 г., май 1987 г.), НИС *Knorr* (июнь 1988 г.), ряде совместных экспедиций на НИС «Профессор Водяницкий» (апрель 1989 г., июнь 1990 г., август 1992 г.). Основные результаты этих работ опубликованы в [7, 8]. Ряд работ выполнялся в Морском гидрофизическом институте [9].

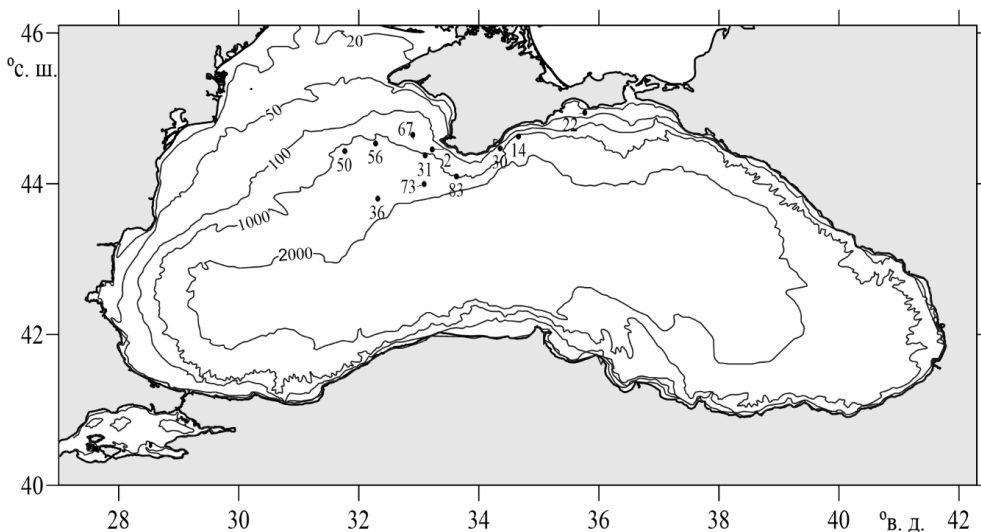
Результатом этих исследований был расчет потоков ^{137}Cs в Черном море [2, 10] и разработка математических моделей переноса ^{137}Cs [11, 12]. В этих работах определены периоды полууменьшения активности ^{137}Cs , активность

^{137}Cs в Черном море до и после аварии на ЧАЭС, последующее вторичное загрязнение Черного моря.

В настоящем исследовании изучено распределение ^{137}Cs в прибрежной и глубоководной частях Черного моря в современный период.

Материалы и методы

Методика отбора проб. Схема расположения станций показана на рис. 1 (для построения рисунков использованы программы *Surfer* (рис. 1, 3, 4), *MS Excel 10* (рис. 2)).



Р и с. 1. Расположение станций отбора проб в рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (14 июня – 7 июля 2017 г.)

F i g. 1. Location of the sampling stations in the cruise of the R/V «Professor Vodyanitsky» (June, 14–July 7, 2017)

С помощью погружного насоса морскую воду закачивали в 8 расположенных на борту судна пластиковых емкостей объемом 1 м^3 каждая. При помощи бортового насоса марки *Unipump JS 60* морскую воду из емкостей прокачивали с объемной скоростью 6,7–9,0 л/мин через систему из трех последовательно соединенных картриджей и сбрасывали за борт судна. Первый по ходу движения воды картридж представлял собой полипропиленовый фильтр с размером пор 1 мкм (*FCPSIM series, Aquafilter Europe Ltd.*) и служил для удаления из воды взвешенных частиц. Во второй и третий картриджи объемом 700 мл загружали по 450 г ферроцианидного сорбента марки ФСС, на котором происходила сорбция радиоцезия. Сорбент ФСС представляет собой неорганический сорбент на основе ферроцианида никеля-калия, нанесенного на поверхность силикагеля. Опытно-промышленная партия сорбента была изготовлена в Институте физической химии и электрохимии РАН (г. Москва) по ТУ 2641-003-51255813-2007. По внешнему виду сорбент ФСС представляет собой гранулы неправильной формы зеленого цвета размером 0,25–3,0 мм. Данный сорбент применяется для переработки жидких радиоактивных отхо-

дов, содержащих ^{137}Cs ; впервые он был использован для концентрирования ^{137}Cs из проб морской воды.

После окончания фильтрации партии воды картриджи с полипропиленовым фильтром и сорбентами просушивали на воздухе и запаковывали в пластиковые пакеты.

Данные о вертикальном распределении температуры и солёности были получены с использованием *Seabird CTD (SBE 911 Plus CTD, Sea-Bird Electronics)*.

Определение активности ^{137}Cs в образцах сорбентов. Измерение активности ^{137}Cs в образцах сорбентов проводили в сосудах Маринелли на низкофоновом гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором *NaI(Tl)* (диаметр – 63 мм, высота – 63 мм, разрешение 7% по пику ^{137}Cs , эффективность регистрации гамма-квантов с энергией 661,7 кэВ 4,5%). Детектор располагался в защите, состоящей из чугунных и свинцовых колец толщиной 150 и 140 мм соответственно. Регистрация и обработка спектрометрических данных осуществлялась программным обеспечением на персональном компьютере. Время регистрации активности единичной пробы составляло в среднем 16 ч. Калибровка эффективности регистрации активности ^{137}Cs в образцах была выполнена с использованием сертифицированного источника грунта с известной удельной активностью *IAEA CU-2006-03*. Погрешность измерения активности каждого образца (σ) обычно не превышала 5%.

Степень извлечения ^{137}Cs (S) из морской воды рассчитывали по уравнению из работы [13]:

$$S = \left(1 - \frac{B}{A}\right) 100\%,$$

где A , B (Бк) – активность ^{137}Cs во втором и третьем картриджах с сорбентом соответственно. Гамма-спектрометрический анализ содержимого полипропиленового фильтра не проводили.

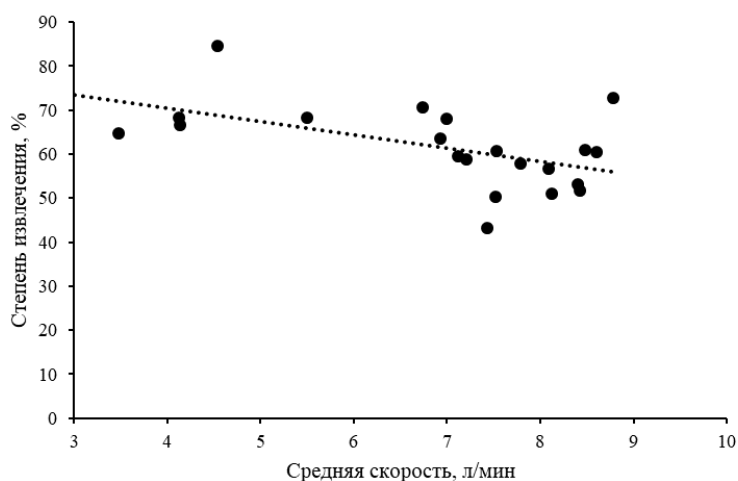
Результаты и обсуждение

Методика отбора проб. Предложено множество методик радиоаналитического определения ^{137}Cs [14]. Так, для концентрирования ^{137}Cs используется соосаждение с фосформолибдатом аммония (ФМА), а также сорбция на селективных сорбентах на основе ФМА и нерастворимых ферроцианидов различных металлов.

Для проведения сорбционного концентрирования ^{137}Cs широко используются волокнистые сорбенты, полученные путем импрегнирования полимерных волокон ферроцианидами переходных металлов, например ферроцианидом меди [15]. К недостаткам данного сорбента относится попутное извлечение из морской воды природного радиоактивного изотопа ^{40}K . Волокнистые сорбенты на основе смешанного ферроцианида калия-никеля проявляют большую селективность по отношению к ^{137}Cs и поэтому достаточно часто используются для радиоаналитического определения ^{137}Cs [15]. Так, полиакрилатное волокно с нанесенным ферроцианидом калия-никеля – *KNiFC-PAN* использовали для определения содержания ^{137}Cs в морской воде, при этом расход волокнистого сорбента составляет 5 мл на 20 л пробы [16].

После концентрирования определяли активность твердой фазы сорбента методом γ -спектрометрии высокого разрешения с использованием полупроводникового детектора из высокочистого германия. Достоинством этого метода является использование для анализа относительно малых объемов морской воды, недостатком – необходимость применения дорогостоящих полупроводниковых γ -спектрометров. В то же время во многих радиохимических лабораториях для определения активности радионуклидов используются более дешевые и доступные сцинтилляционные γ -спектрометры.

В процессе испытаний определяли зависимость степени извлечения ^{137}Cs от объемной скорости пропускания морской воды через адсорберы с сорбентом ФСС (рис. 2). Полученные результаты показали, что наблюдается небольшое снижение степени извлечения ^{137}Cs , в среднем с 70 до 60% при увеличении скорости с 3 до 9 $\text{дм}^3/\text{мин}$.



Р и с. 2. Зависимость степени извлечения ^{137}Cs от средней объемной скорости пропускания морской воды

F i g. 2. Dependence of the ^{137}Cs recovery rate on the average volumetric speed of seawater transmission

Степень извлечения радионуклида из морской воды зависит от многих факторов: скорости прокачки пробы через сорбент, конечного объема пробы, содержания радионуклида. По результатам измерений, степень извлечения ^{137}Cs сорбентом ФСС составляла в среднем $62 \pm 9\%$.

Основной вклад в погрешность использованной методики определения активности цезия в морской воде вносит статистическая ошибка счета активности препарата, которая для выбранной продолжительности измерения полученных активностей счетных образцов сорбентов и использованного детектора не превышала 7%.

Распределение ^{137}Cs и профили активности. За исследованный период было отобрано и обработано 22 пробы морской воды на 11 станциях. Полученные результаты приведены в таблице.

Параметры проб и станций
Parameters of samples and stations

Номер станции / Station number	Координаты точки отбора / Coordinates of sampling point		Глубина, м / Depth, m	Соленость, ‰ / Salinity, ‰	Объем пробы, м ³ / Sample volume, m ³	S, % / S ₁ , %	A _{уд} ¹³⁷ Cs, Бк/м ³ / A _{сп} ¹³⁷ Cs, Bq/m ³	Доверительный интервал / Confidence interval
	с. ш. / N	в. д. / E						
2	44,456°	33,225°	5	18,28	1,978	72,9	6,01	0,25
			25	18,31	3,096	59,5	6,85	0,25
14	44,628°	34,663°	65	18,57	2,932	68,1	6,75	0,26
			3	18,57	2,013	84,6	6,00	0,35
			20	18,35	3,045	58,0	6,55	0,24
22	44,946°	35,764°	50	18,52	2,966	53,1	7,29	0,26
			3	18,10	2,959	60,9	6,56	0,24
			23	18,29	4,107	60,4	7,17	0,24
30	44,469°	34,353°	3	18,11	2,000	68,4	5,70	0,26
			16	18,14	3,084	43,3	6,99	0,25
31	44,372°	33,105°	50	18,52	3,083	51,7	6,74	0,24
			3	18,25	1,977	66,7	6,44	0,23
			20	18,25	3,056	56,6	6,31	0,23
36	43,802°	32,312°	60	18,60	3,009	51,1	7,13	0,25
			3	18,42	1,984	64,8	6,32	0,27
50	44,430°	31,764°	20	18,39	3,095	50,3	6,91	0,24
			45	18,63	3,062	70,6	6,95	0,26
56	44,537°	32,278°	3	18,32	8,250	60,8	6,64	0,20
67	44,646°	32,902°	3	18,25	2,000	68,3	7,37	0,30
73	43,993°	33,088°	3	18,30	8,149	58,8	8,76	0,26
83	44,099°	33,629°	3	18,20	8,196	63,6	7,94	0,25
			3	17,96	3,717	74,4	7,56	0,34

Распределение ^{137}Cs в поверхностном слое Черного моря показано на рис. 3. Величина активности ^{137}Cs изменялась по пространству в интервале 5,7–8,8 Бк/м³ и составляла в среднем $6,9 \pm 0,2$ Бк/м³. Повышенные величины активности ^{137}Cs наблюдались в западной части исследуемого района, пониженные – в восточной. Такая пространственная изменчивость может быть связана с различием в удаленности от устья Днепра [2], обеспечивающего поступление радионуклида ^{137}Cs , вымываемого грунтовыми водами из почв, в Черное море.

В работе [10] отмечалось, что по данным наблюдений в 2007 г. значение активности ^{137}Cs в поверхностном слое Черного моря составляло 20 Бк/м³. Таким образом, за 11-летний период 2007–2017 гг. наблюдается уменьшение средней величины активности ^{137}Cs до 7–8 Бк/м³. Полученные данные согласуются с литературными. Согласно [2], период полууменьшения активности ^{137}Cs составляет 8,6 года за 1987–2011 гг. Снижение активности ^{137}Cs в поверхностном слое Черного моря связано с его радиоактивным распадом и проникновением в нижерасположенные слои [2]. В работе [12] представлены полученные с использованием модели *POSEIDON-R* результаты численных экспериментов, направленных на изучение эволюции поля концентрации ^{137}Cs в Черном и Средиземном морях. Для области моделирования № 69, согласно указанной работе, активность ~ 8 Бк/м³ относится к 2017 г.

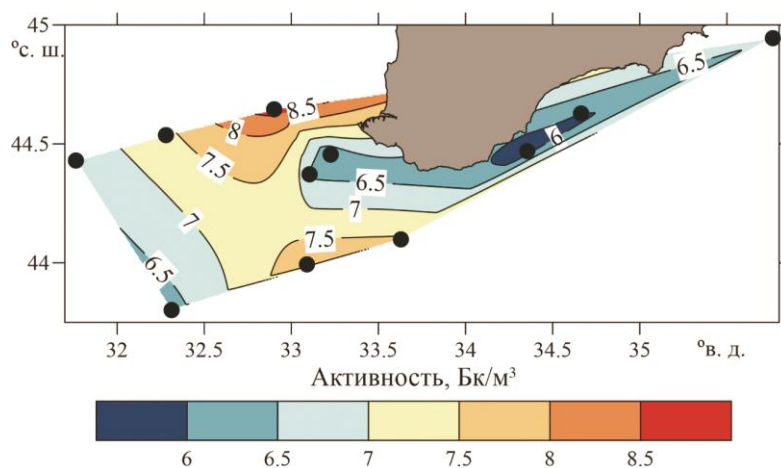


Рис. 3. Активность ^{137}Cs в поверхностном слое (до 3 м) Черного моря у Крымского п-ова
Fig. 3. Activity of ^{137}Cs in the surface layer (up to 3 m) in the Black Sea nearby the Crimea Peninsula

Профили активности ^{137}Cs были получены на 6 станциях (рис. 4). Во всех случаях вариация величины активности ^{137}Cs с глубиной не превышала погрешности определения этого параметра. Полученные данные согласуются с литературными [10], согласно которым до глубины 50 м не было обнаружено изменения активности ^{137}Cs по сравнению с поверхностной активностью.

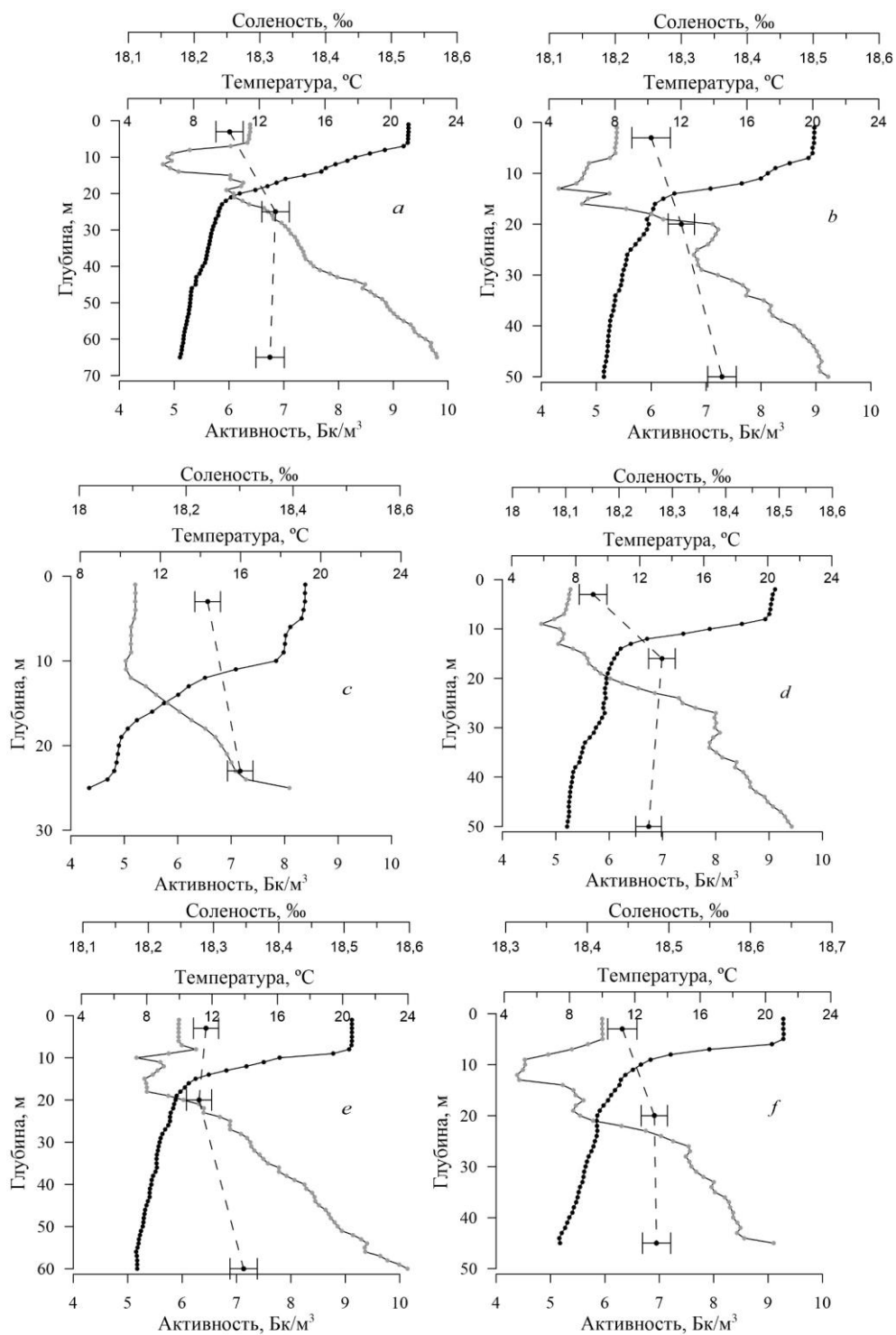


Рис. 4. Активность ^{137}Cs в верхнем квазиоднородном слое Черного моря на ст. 2 (a), 14 (b), 22 (c), 30 (d), 31 (e), 36 (f)

Fig. 4. Activity of ^{137}Cs in the upper mixed layer of the Black Sea at stations 2 (a), 14 (b), 22 (c), 30 (d), 31 (e), 36 (f)

Заключение

Впервые для извлечения ^{137}Cs из проб морской воды использован ферроцианидный сорбент марки ФСС на основе ферроцианида калия-никеля и силикагеля. Показаны высокие степени извлечения (более 60%) ^{137}Cs данным сорбентом.

Полученные для исследованной области значения активности ^{137}Cs изменяются в диапазоне 5,7–8,8 Бк/м³ и составляют в среднем $6,9 \pm 0,2$ Бк/м³. Повышенные значения активности ^{137}Cs наблюдаются в западной части исследованного района, пониженные – в восточной. Согласно данным наблюдений, активность ^{137}Cs в диапазоне глубин 3–65 м изменяется в пределах погрешности метода. Полученные в работе величины активности ^{137}Cs согласуются с результатами численных экспериментов, которые проводились с использованием модели *POSEIDON-R*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Г. Г. Поликарпов [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 667 с.
2. *Gulin S. B., Egorov V. N.* Radioactive Tracers in the Black Sea: A Tool for Environmental Assessment and Ecological Regulation // *Genetics, Evolution and Radiation* / Eds. V. Korogodina, C. Mothersill, S. Inge-Vechtomov, C. Seymour. Cham : Springer, 2016. P. 303–313. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48838-7_25
3. *Mirzoeva N. Yu., Gulin S. B., Miroshnichenko O. N.* Strontium and cesium radionuclides // *The Black Sea System* / Eds. A. P. Lisitsin. Moscow : Scientific World, 2018. P. 605–624. <https://doi.org/10.29006/978-5-91522-473-4.2018.605>
4. ^{90}Sr and ^{137}Cs in the Black Sea after the Chernobyl NPP accident: inventories, balance and tracer applications / V. N. Egorov [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. 1999. Vol. 43, iss. 2. P. 137–155. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(98\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(98)00088-5)
5. Secondary radioactive contamination of the Black Sea after Chernobyl accident: recent levels, pathways and trends / S. B. Gulin [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. Vol. 124. P. 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.04.001>
6. Deep-water profiling of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the Black Sea: a further insight into dynamics of the post-Chernobyl radioactive contamination / S. B. Gulin [et al.] // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015. Vol. 304, iss. 2. P. 779–783. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3848-9>
7. Determination of fission products and actinides in the Black Sea following the Chernobyl accident / K. O. Buesseler [et al.] // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1990. Vol. 138, iss. 1. P. 33–47. <https://doi.org/10.1007/BF02049345>
8. *Buesseler K.O., Livingston H.D.* Time-Series Profiles of ^{134}Cs , ^{137}Cs and ^{90}Sr in the Black Sea // *Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea*. NATO ASI Series (Series 2: Environment) / Eds. E. Özsoy, A. Mikaelyan. Dordrecht : Springer, 1997. Vol. 27. P. 239–251. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5758-2_19
9. Radioactive isotopes of caesium in the waters and near-water atmospheric layer of the Black Sea / V. N. Eremeev [et al.] // *Soviet Journal of Physical Oceanography*. 1991. Vol. 2, iss. 1. P. 57–64. <https://doi.org/10.1007/BF02197418>
10. Evolution and fluxes of ^{137}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. The application of radiotracers to a study of Black Sea circulation: Validation of numerical simulations against observed weapons testing and Chernobyl ^{137}Cs data / J. V. Staneva [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 1999. Vol. 104, iss. C5. P. 11099–11114. <https://doi.org/10.1029/1998JC900121>

12. Transport and fate of ^{137}Cs in the Mediterranean and Black Seas system during 1945–2020 period: A modelling study / R. Bezhenar [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019. Vol. 208–209. A. 106023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106023>
13. Mann D. R., Casso S. A. In situ chemisorption of radiocesium from seawater // *Marine Chemistry*. 1984. Vol. 14, iss. 1. P. 307–318. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(84\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0304-4203(84)90027-6)
14. Lehto J., Hou X. Chemistry and analysis of radionuclides. Laboratory techniques and methodology. Weinheim : Wiley-VCH, 2011. 426 p.
15. Šebesta F. Composite sorbents of inorganic ion-exchangers and polyacrylonitrile binding matrix. I. Methods of modification of properties of inorganic ion-exchangers for application in column packed beds // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1997. Vol. 220, iss. 1. P. 77–88. <https://doi.org/10.1007/BF02035352>
16. New applications of KNiFC-PAN resin for broad scale monitoring of radiocesium following the Fukushima Dai-ichi nuclear disaster / C. F. Breier [et al.] // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2016. Vol. 307, iss. 3. P. 2193–2200. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4421-x>

Об авторах:

Довгий Илларион Игоревич, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат химических наук, **ORCID ID: 0000-0001-8706-3810**, dovhyi.illarion@yandex.ru

Кременчуцкий Дмитрий Александрович, младший 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

Бежин Николай Алексеевич, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1670-4251**, nickbezhin@yandex.ru

Козловская Ольга Николаевна, младший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 5386-4791**, o.n.kozlovska@gmail.com

Милютин Виталий Витальевич, заведующий лабораторией хроматографии радиоактивных элементов, ФГБУН ИФХЭ РАН (119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4), доктор химических наук, **SPIN-код: 3106-6795**, vmilyutin@mail.ru

Козлитин Евгений Анатольевич, старший научный сотрудник, лаборатория хроматографии радиоактивных элементов, ФГБУН ИФХЭ РАН (119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4), кандидат химических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0381-8786**, evgeny_kozlitin@mail.ru