

УДК 539.163:574.64

СОВРЕМЕННЫЕ УРОВНИ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СОЛЕННЫХ ОЗЕР КРЫМА

© 2020 г. Н. Н. Терещенко^{1,*}, А. В. Трапезников², А. А. Параскив¹,
В. Ю. Проскурнин¹, А. П. Платаев²

¹Федеральный исследовательский центр “Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН”, Севастополь, Россия

²Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: ntereshchenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.09.2019 г.

Приведены данные об уровнях содержания α -излучающих радиоизотопов плутония в поверхностных донных отложениях десяти соленых озер Крыма из разных географических групп. Получены профили вертикального распределения радиоизотопов в кернах донных садков до глубины 25–30 см в озерах из этих групп бальнеогрязевых ресурсов крымских озер. Самые высокие значения были отмечены в слое 10–15 см в оз. Сасык-Сиваш (2 Бк/кг). Удельная активность радиоизотопов плутония $^{239,240}\text{Pu}$ в воде этих водоемов составляла 6.6–16.5 мБк/м³. На примере двух озер показано, что донные отложения характеризуются высокой аккумуляционной способностью в отношении радиоизотопов плутония. Коэффициенты накопления осадками $^{239,240}\text{Pu}$ достигали величин порядка $n \times 10^4$ кг/кг. Основное количество плутония в донных отложениях исследованных озер представлено радиоизотопами плутония глобального происхождения.

Ключевые слова: соленые озера Крыма, радиоизотопы $^{238,239,240}\text{Pu}$, донные отложения, вода, коэффициенты накопления, авария на Чернобыльской АЭС, радиоактивные глобальные выпадения

DOI: 10.31857/S0869803120020113

За период использования человечеством ядерной энергии в мирных и военных целях в регионе, где располагается полуостров Крым, основными источниками поступления антропогенных искусственных радионуклидов были глобальные радиоактивные выпадения после испытаний ядерного оружия в открытых средах и радиоактивные выпадения после аварии на Чернобыльской АЭС [1, 2]. Так как основной вклад в дозовые нагрузки дают короткоживущие радионуклиды с коротким периодом полураспада ($T_{1/2}$) (например, $^{131}\text{I} - T_{1/2} = 8.04$ сут; $^{133}\text{Xe} - T_{1/2} = 5.2$ сут и др.) и основные дозобразующие радионуклиды со средними периодами полураспада, к которым относятся ^{137}Cs и ^{90}Sr с $T_{1/2} = 30.2$ и 29.1 года соответственно, то изначально им уделялось большое внимание при изучении радиоэкологической ситуации в экосистемах. По истечении десятилетий эти радионуклиды частично распались, а также были подвержены миграции [3], в результате чего уровни их содержания снизились и продолжают снижаться. Уровни же долгоживущих радиоизотопов, таких как ^{239}Pu и ^{240}Pu ($T_{1/2} - 29\,400$ и 6400 лет соответственно), за этот период значимо не снизились за счет радиоактивного распада, и их количество в

экосистемах от инцидента к инциденту увеличивается. Изотопы $^{239,240}\text{Pu}$ нарабатываются при использовании ядерных технологий, и они нашли широкое применение в разных областях антропогенной деятельности, их количество возрастает [4], что увеличивает вероятность новых поступлений этих радиоизотопов в окружающую среду. Радиоизотопы $^{239,240}\text{Pu}$ являются α -излучателями и поэтому характеризуются высокой радиотоксичностью, так как коэффициент качества для α -излучения с энергией частиц порядка 5 Мэв равен 20.

Водные экосистемы, в частности озера, выступают в роли накопителей радиоактивного и химического загрязнения, особенно бессточные водоемы, куда после первичного загрязнения от радиоактивных атмосферных выпадений поступает, как правило, вторичное загрязнение по природным или техногенным водотокам, со стоком с поверхностей ландшафтов, со сточными водами естественного и антропогенного происхождения. Как известно, основным депо плутония в водных экосистемах как солоноводных, так и пресноводных водоемов, служат донные отложения. Особенно высокие уровни его накопления отмечаются в иловых донных осадках [3, 5–7]. На Крымском полуострове расположено большое количество



Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемых соленых озер Крыма. Штриховой линией и римскими цифрами обозначены географические группы бальнеогрязевых ресурсов крымских озер, черными кружочками и арабскими цифрами – исследуемые озера: I – Евпаторийская группа озер: 1 – Кызыл-Яр, 2 – Сасык-Сиваш; II – Тарханкутская группа: 3 – Джарылгач, 4 – Бакальское; III – Перекопская группа: 5 – Красное, 6 – Киятское, 7 – Кирлеутское; IV – Керченская группа: 8 – Акташское, 9 – Чокракское, 10 – Тобечикское.

Fig. 1. Map of the studied Crimean salt lakes location. Dashed line and Roman numerals denote the geographic groups of mud-balneous resources of the Crimean lakes, black circles and Arabic numerals indicate the investigated lakes: I – Yevpatoriya group of lakes: 1 – Kyzyl-Yar, 2 – Sasyk-Sivash; II – Tarkhankut group: 3 – Dzharylhach, 4 – Bakal; III – Perekop group: 5 – Krasnoye, 6 – Kiyat, 7 – Kirleut; IV – Kerch group: 8 – Aktash, 9 – Chokrak, 10 – Tobechnik.

соленых озер, часть из которых используется или как сырьевая база химических веществ и биологических ресурсов, или как оздоровительно-рекреационные объекты [8–10]. В современный период существует целый ряд проблем по сохранению, восстановлению и дальнейшему экологически приемлемому использованию соленых озер Крыма как уникальных природных экологических систем и комплексного ценного ресурса для человека [9, 11]. Одним из используемых полезных ресурсов озер являются их донные отложения – лечебные грязи, кроме того, широко используется рапа озер. Поэтому важно знать уровни загрязнения разных компонент озерных экосистем, особенности их миграции в водоемах, критические компоненты экосистем, где больше всего накапливаются загрязнители. Важна также величина аккумуляционной способности разных компонент водоема в отношении данного загрязнителя, особенно для веществ, которые сохраняют свои токсические свойства на протяжении многих десятков и сотен лет, к которым относятся долгоживущие радиоизотопы плутония.

Целью работы было изучение уровней концентрации активности $^{238,239,240}\text{Pu}$ в донных отложениях и воде, их вертикальное распределение в

толще осадка озер из разных групп бальнеогрязевых ресурсов крымских озер, оценка аккумуляционной способности озерных донных отложений в отношении радиоизотопов плутония.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили 10 крымских озер четырех географических групп из семи групп соленых озер, выделяемых в Крыму [12] (рис. 1). Они были выбраны в связи с тем, что выделенные четыре группы бальнеогрязевых ресурсов Крыма [9] совпадают с одноименными географическими группами озер. Перечень и локализация исследуемых водоемов представлены на рис. 1. Для исследований были выбраны водоемы, различающиеся по уровню антропогенной нагрузки, солёности вод, по происхождению, расположенные на побережье как Черного, так и Азовского морей.

Пробы в озерах отбирали в ходе прибрежных сухопутных экспедиций в апреле–ноябре 2016–2017 гг. В десяти озерах (рис. 1) были отобраны пробы донных осадков поверхностного слоя 0–5 см, а вертикальные керны – в четырех озерах (по одному озеру от каждой группы бальнеогрязевых ресурсов Крыма). Отбор поверхностных проб производили широкой грунтовой акриловой трубкой, диаметром 120 мм, а керны донных отложений высотой до 25–30 см были взяты при помощи трубчатого пробоотборника диаметром 58 мм с вакуумным затвором. Для исследования вертикального профиля распределения $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu керны осадка нарезали на пробы-слои с шагом 5 см, используя винтовой экструдер с фиксируемым шагом спирали 0.5 см.

Для определения радиоизотопов плутония в природных образцах использовали известные методы, включая рекомендованные МАГАТЭ [3, 13, 14]. Пробы воды объемом несколько сот литров отбирали с помощью насосов в озерах Кызыл-Яр и Джарылгач в пластиковые канистры. На следующие сутки в условиях стационарной лаборатории вносили радиоактивный трассер плутония в пробу воды и проводили концентрирование плутония вместе с трансурановыми элементами в пробе путем поочередного 2-кратного соосаждения с диоксидом марганца, а затем с гидроксидом железа(III), чередуя их с процедурами фильтрации и центрифугирования. Полученный осадок растворяли в кислоте и готовили раствор для нанесения на хроматографические колонки. Последующую очистку и выделение радиоизотопов плутония проводили посредством ионообменной хроматографии, согласно методике, применяемой для обработки проб донных отложений, схема которой представлена на рис. 2.

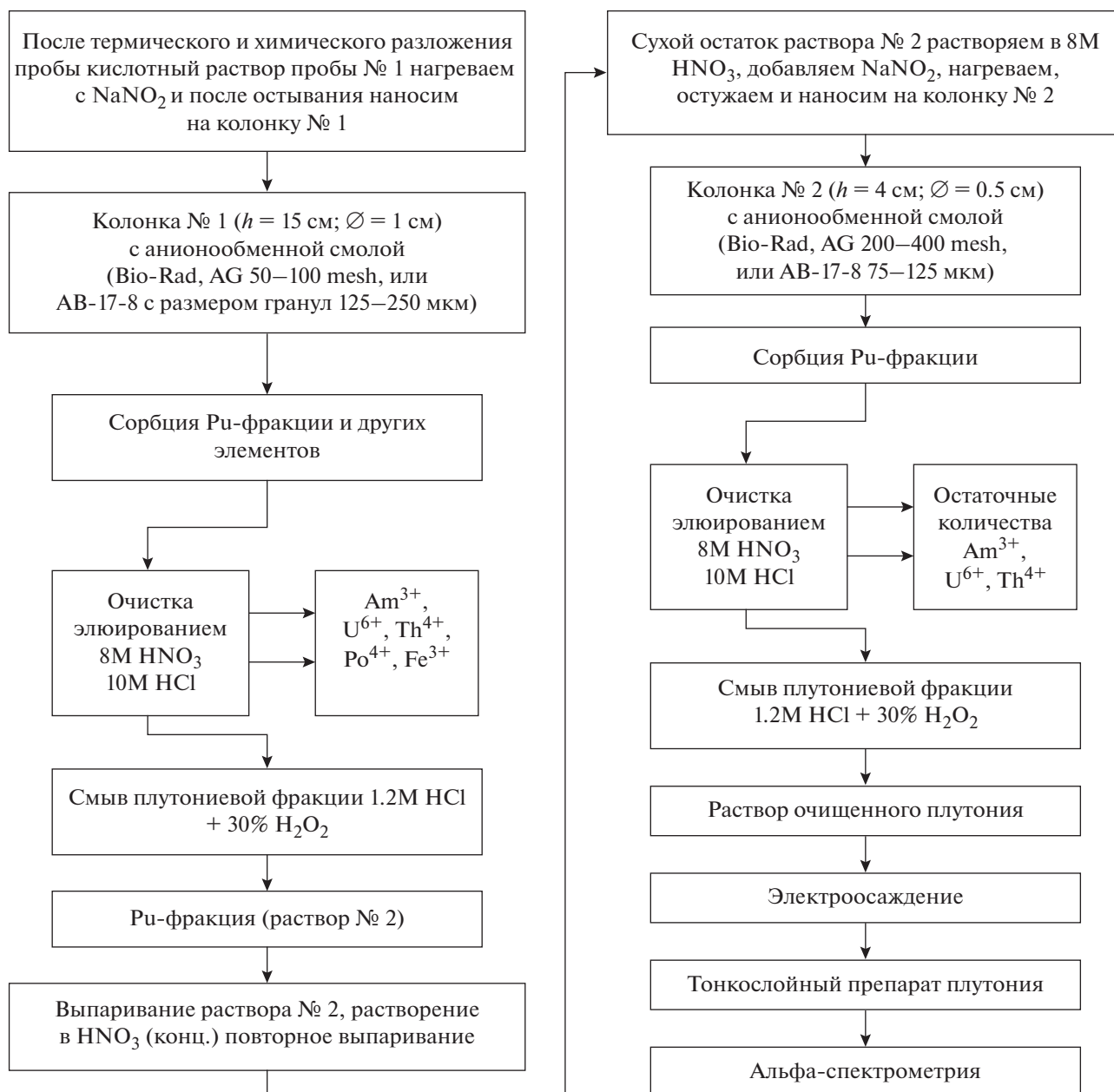


Рис. 2. Схема очистки, выделения и электроосаждения плутония для α -спектрометрических измерений радионуклидов плутония в пробах.

Fig. 2. Scheme of the plutonium purification, extraction and electrodeposition for α -spectrometric measurements of the plutonium radioisotopes in samples.

Для определения концентрации активности радионуклидов плутония в пробах донных отложений осадок высушивали на воздухе. Затем сушили пробы до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 80°C. Сухие донные осадки гомогенизировали, измельчали, просеивали через сито и озоляли при температуре 550°C в муфельной печи. Для анализа отбирали навеску золы не более 20 г. В озоленные пробы вносили радиоактивную метку – изотоп ^{242}Pu для отслежи-

вания химического выхода плутония. Далее проводили выщелачивание с последующей очисткой и выделением плутония с использованием ионообменных смол (рис. 2). Из полученного очищенного раствора плутония готовили тонкослойные счетные образцы на стальных шлифованных дисках методом электроосаждения, которые использовали для определения активности α -излучающих радионуклидов плутония на α -спектрометрическом комплексе “EG&G ORTEC OСТЕТЕ PC”

Таблица 1. Удельная активность радиоизотопов плутония в донных отложениях озер Крыма в поверхностном слое 0–5 см (период отбора проб 2016–2017 гг.)**Table 1.** The $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{238}Pu activity concentration in the bottom sediments of the Crimea salt lakes in the surface layer 0–5cm (sampling period 2016–2017)

Номер озера*	Название озера	Удельная активность донных отложений, Бк/кг		$^{238}\text{Pu}/(^{239+240}\text{Pu})$	S, ‰
		$^{239+240}\text{Pu}$	^{238}Pu рассчитано на 1986 г.	рассчитано на 1986 г.	2016 г.
1	Кызыл-Яр	0.419 ± 0.027	0.014 ± 0.005	0.034 ± 0.011	3.5 ± 0.1
2	Сасык-Сиваш	0.516 ± 0.006	0.006 ± 0.002	0.011 ± 0.011	280 ± 0.6
3	Джарылгач	0.443 ± 0.024	0.031 ± 0.006	0.069 ± 0.013	115 ± 0.2
4	Бакальское	0.049 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.032 ± 0.038	46.5 ± 0.1
5	Красное	0.096 ± 0.042	<0.001	< 0.010 ± 0.010	330 ± 0.6
6	Киятское	0.024 ± 0.020	<0.001	< 0.041 ± 0.041	200 ± 0.4
7	Кирлеутское	0.086 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.049 ± 0.040	235 ± 0.5
8	Акташское	0.096 ± 0.010	0.008 ± 0.003	0.078 ± 0.035	88.5 ± 0.2
9	Чокракское	0.276 ± 0.017	0.005 ± 0.003	0.019 ± 0.011	226 ± 0.5
10	Тобечикское	0.232 ± 0.010	0.081 ± 0.071	0.348 ± 0.346	176 ± 0.4

Примечание. * – Номер озера в соответствии с картой (рис. 1); S – соленость вод озера.

фирмы ORTEC (США) в вакуумированных камерах с низкофоновыми полупроводниковыми детекторами. Измерения проводили в ФИЦ “Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН” в отделе радиационной и химической биологии и в отделе континентальной радиоэкологии в Институте экологии растений и животных Уральского отделения РАН. Обработку полученных спектров проводили автоматически с помощью программы “MAESTRO™ II, модель Ф64-В1”, поставляемой фирмой-производителем прибора. В связи с тем, что α -спектры радиоизотопов $^{239,240}\text{Pu}$ перекрываются, измеряли их суммарную активность ($^{239+240}\text{Pu}$) и индивидуальную активность радиоизотопов ^{238}Pu и ^{242}Pu . Ошибка определения активности $^{239+240}\text{Pu}$ в пробах окружающей среды для донных отложений не превышала 13%, для воды – 20%. Для ^{238}Pu , активность которого в пробах была значительно ниже, ошибка определения возрастала с уменьшением активности проб. Результаты измерений проходили стандартную статистическую обработку [3]. Данные по определению удельной активности донных отложений в отношении радиоизотопов плутония представлены в виде: среднее значение $\pm 1\sigma$. Удельную активность донных отложений и воды в отношении $^{238,239,240}\text{Pu}$ выражали для донных отложений в Бк/кг сухой массы осадка, доведенной до постоянного веса, для воды – в мБк/м³.

Был использован общепринятый метод радиоизотопной геохронологической датировки поступления радиоизотопов плутония в донные

осадки [3]. Датировку вертикального профиля радиоизотопов плутония проводили по идентификации принадлежности максимумов $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu к глобальным выпадениям или выпадениям после аварии на ЧАЭС. Определение происхождения радиоизотопов плутония к этим двум источникам выполнено с помощью величины отношения удельных активностей $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ [3, 15].

Как известно, в среднем в северном полушарии отношение удельных активностей $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ составляло в глобальных выпадениях около 0.03 [1], а в чернобыльских выпадениях – 0.47 [16]. Таким образом, оно отличалось в радиоактивных выпадениях от этих двух источников более чем на порядок, что позволяет оценивать вклад каждого из них в суммарное загрязнение радиоизотопами плутония донных отложений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам исследования удельная активность донных отложений в отношении радиоизотопов плутония в поверхностном 0–5 см слое донных отложений соленых озер в разных водоемах отличалась в разных озерах более чем на порядок величины (табл. 1). Уровни удельной активности донных отложений в отношении $^{239+240}\text{Pu}$ изменялись в пределах от 0.024 до 0.516 Бк/кг (табл. 1) [17, 18]. Среднее значение удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в слое 0–5 см в донных осадках озер было равно 0.22 Бк/кг.

Низкие уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях были отмечены в озерах Перекоп-

ской группы, и среди них самые низкие значения измерены в пробах из оз. Киятское. Самые высокие значения удельной активности радионуклидов плутония в поверхностном слое донных осадков отмечены в озерах Евпаторийской группы и оз. Джарылгач из Тарханкутской группы (табл. 1).

Для исследования вертикального распределения $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu в кернах донных отложений были выбраны озера с высокой соленостью (>100‰) в каждой из исследованных четырех географических групп крымских озер и со сравнительно более высоким содержанием радионуклидов в поверхностном слое (0–5 см) донных отложений (табл. 1): Евпаторийская группа – оз. Сасык-Сиваш, Тарханкутская группа – оз. Джарылгач, Перекопская группа – оз. Кирлеутское, Керченская группа – оз. Чокрак.

Результаты исследования вертикального распределения $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu в кернах донных осадков с четырех соленых озер Крыма представлены на рис. 3 и 4. В оз. Сасык-Сиваш (Евпаторийская группа) (рис. 3, а–в) радионуклиды плутония чернобыльского происхождения сосредоточены в верхнем 0–7.5 см слое, где отношение $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ было выше характерного для глобальных выпадений. В этом слое $^{239+240}\text{Pu}$ составлял в осадке 0.5 Бк/кг. Максимальные значения приурочены к слою 10–15 см. Здесь удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях была равна 2.05 Бк/кг, и плутоний в этом слое имеет глобальное происхождение (отношение $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu} \leq 0.03$). Следовательно, плотность выпадений радиоактивных изотопов плутония глобального происхождения была значительно выше, чем таковая чернобыльского происхождения [3, 15, 19]. В слое 20–25 см концентрация активности $^{239+240}\text{Pu}$ составляла 0.02, а в слое 25–27 см осадка была ниже 0.01 Бк/кг. Следовательно, слой донных отложений, содержащий антропогенные α -излучающие радионуклиды плутония, ограничен в озере слоем 0–27 см. При этом максимальной удельной активностью донных отложений в отношении радионуклидов $^{239+240}\text{Pu}$ характеризовался слой – 10–15 см.

В оз. Джарылгач (Тарханкутская группа) (рис. 3, г–е) максимальный уровень чернобыльского загрязнения в исследованном керне донных отложений приурочен к слою 0–5 см, а в слое 5–12 см наблюдали максимум радионуклидов плутония глобального происхождения. В целом, по полученным данным, толщина осадка, содержащего достоверно определяемые количества $^{239+240}\text{Pu}$, ограничена слоем 0–15 см.

В оз. Кирлеутское (Перекопская группа) вертикальные профили распределения $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu и отношения $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ достаточно структурированы и характеризуются явно выра-

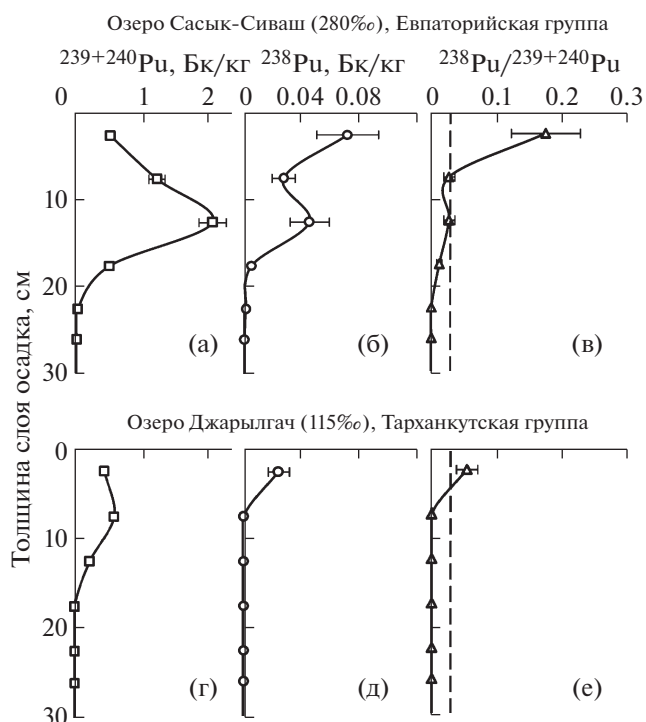


Рис. 3. Вертикальные профили удельной активности радионуклидов плутония в донных отложениях: (а, г) – $^{239+240}\text{Pu}$, (б, д) – ^{238}Pu (Бк/кг) и отношения удельных активностей $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ – (в, е) в донных отложениях оз. Сасык-Сиваш и Джарылгач. Вертикальная штриховая линия обозначает средний уровень отношения удельных активностей $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ в глобальных выпадениях.

Fig. 3. Vertical activity concentration profiles of lakes bottom sediments of plutonium radioisotopes: (а, г) – $^{239+240}\text{Pu}$, (б, д) – ^{238}Pu (Bq/kg) and activity concentration ratio profiles of $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ – (в, е) in the lakes Sasyk-Sivash and Dzharlygach. Vertical dashed line indicates the average activity ratio of $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ in global fallouts.

женным пиком удельной активности донных отложений в отношении радионуклидов плутония $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu в слое 20–25 см (рис. 4, а–в). Этот пик приурочен к периоду максимальных глобальных выпадений. Четкий максимум отношения $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ в слое 5–10 см – индикатор поступления плутония чернобыльского происхождения (рис. 4, в). Следовательно, максимум чернобыльских выпадений приурочен к этому слою (0.054 Бк/кг). На профиле абсолютных значений удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu в донных отложениях, с учетом ошибки ее определения, а также более низкой плотности чернобыльских радиоактивных выпадений, не представляется возможным отследить период чернобыльских выпадений (рис. 4, а, б). И только анализ профиля отношения удельных активностей радионукли-

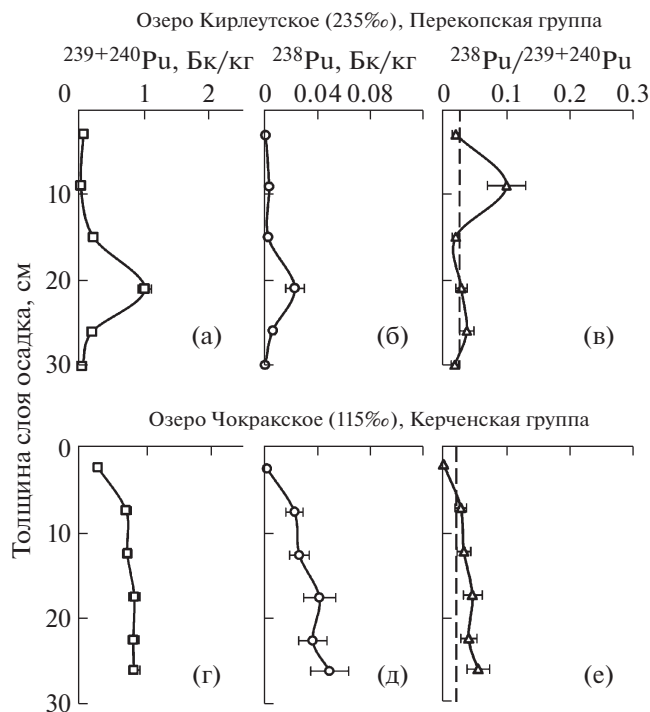


Рис. 4. Вертикальные профили удельной активности радиоизотопов плутония в донных отложениях: (а, г) — $^{239+240}\text{Pu}$, (б, д) — ^{238}Pu (Бк/кг) и отношения удельных активностей $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ — (в, е) в донных отложениях оз. Кирлеутское и Чокракское. Вертикальная штриховая линия обозначает средний уровень отношения удельных активностей $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ в глобальных выпадениях.

Fig. 4. Vertical activity concentration profiles of lakes bottom sediments of plutonium radioisotopes: (а, г) — $^{239+240}\text{Pu}$, (б, д) — ^{238}Pu (Bq/kg) and activity concentration ratio $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ — (в, е) in the lakes Kirleut and Chokrak. Vertical dashed line indicates the average level of activity ratio $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ in global fallout.

пов позволяет выделить период поступления плутония чернобыльского происхождения. Самые высокие значения $^{239+240}\text{Pu}$ (1.01 Бк/кг) относятся к слою 20–25 см и имеют глобальное происхождение (рис. 4, а). Следовательно, максимальные выпадения плутония чернобыльского происхождения не превышали 10% от глобальных выпадений, что характерно для этого региона [19]. В слое 28–32 см уровень удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях снизился до 0.07 Бк/кг. Следовательно, $^{239+240}\text{Pu}$ в донных осадках озера содержится в слое 0–35 см.

В оз. Чокрак (Керченская группа) след чернобыльского загрязнения в осадках озера прослеживается до глубины 27 см, хотя не исключено влияние фактора перемешивания, на что указывает размытый вид профиля (рис. 4, г–е). Максимальные величины $^{239+240}\text{Pu}$ в керне донных отло-

жений составляли порядка 0.800 Бк/кг. В современный период удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в осадке снизилась и в поверхностном слое составляет 0.275 Бк/кг. Пики чернобыльских и глобальных выпадений не удалось идентифицировать по полученным данным (рис. 4, г–е), возможно они находятся глубже, возможно размыты и поэтому, чтобы оценить полную глубину слоя загрязнения $^{239+240}\text{Pu}$ донных осадков этого озера, необходимы дальнейшие исследования более глубоких кернов.

Изменение удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях озер из разных географических групп с возрастанием солёности не имело однонаправленной тенденции (табл. 1): в озерах с достаточно близкой солёностью наблюдали разные уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в донных осадках.

В пределах же каждой географической группы солёных озер наблюдали возрастание удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в донных осадках озер с возрастанием солёности вод.

Определение удельной активности плутония в воде солёных озер было выполнено в двух исследуемых группах, а именно в оз. Кызыл-Яр из Евпаторийской группы и оз. Джарылгач из Тарханкутской группы крымских озер, где уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностных донных осадках были близки и относительно высоки, 0.419 и 0.443 Бк/кг соответственно (табл. 1). Установлено, что удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в воде в современный период составляла в оз. Джарылгач 6.6 мБк/м³ и в озере Кызыл-Яр — 16.5 мБк/м³.

Полученные данные позволили оценить величину аккумуляционной способности озерных донных отложений в отношении радиоизотопов плутония $^{239+240}\text{Pu}$. Ее количественным показателем служат коэффициенты накопления ($K_n^{239+240}\text{Pu}$), показывающие, во сколько раз больше радиоизотопов содержится в донных осадках по сравнению с их содержанием в воде [20]. Результаты расчета свидетельствуют, что $K_n^{239+240}\text{Pu}$ варьировал в пределах от 25 500 кг/кг до 76 400 кг/кг. В среднем $K_n^{239+240}\text{Pu}$ донными отложениями озер был равен 5×10^4 кг/кг и характеризовал достаточно высокую аккумуляционную способность иловых донных осадков озер в отношении радиоизотопов плутония.

ОБСУЖДЕНИЕ

Озера играют барьерную роль в миграции радионуклидов, в частности тех, которые в основном накапливаются донными отложениями и, особенно, в случае, если водоемы бессточные. С одной стороны, озера широко используются человеком, а с другой стороны, они служат накопителями радионуклидов. Поэтому исследования α -излучающих радиоизотопов плутония в дон-

ных отложениях и воде (часто вместе с другими техногенными и природными радионуклидами) выполнялись во многих озерах в разных частях мира [18]. Уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в озерных осадках различались на порядки величин, что связано, прежде всего, с географическим положением озер, пятнистостью радиоактивных выпадений и удаленностью от источника загрязнения. Если не рассматривать озера, расположенные непосредственно у источника загрязнения, например, озера в 30-километровой зоне ЧАЭС или оз. Карачай, то плотность загрязнения $^{239+240}\text{Pu}$ донных осадков озер в разных странах Европы и Азии составляла от 16 до 460 Бк/м². Согласно нашим данным, крымские соленые озера занимают среднее положение по плотности загрязнения донных осадков $^{239+240}\text{Pu}$, которая в десяти исследованных соленых озерах Крыма варьировала от 87 до 196 Бк/м² [21].

Удельная активность донных отложений в отношении радиоизотопов плутония $^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностном слое осадков соленых озер варьировала в пределах от 0.024 до 0.516 Бк/кг (табл. 1). Она была ниже таковой в прибрежных черноморских районах (0.3–1.8 Бк/кг) [15] и значительно ниже, чем в черноморских осадках из глубоководной области Черного моря, которая составляла 6.3 Бк/кг. Вероятно, это связано с наличием стока больших рек, впадающих в Черное море, и большой площадью водосборного бассейна моря (2.3 млн км²), а также пятнистостью радиоактивных выпадений.

По результатам изучения вертикального распределения $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях соленых озер в кервах (рис. 3, 4) было установлено, что в пиках плутония глобального происхождения максимальные значения удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ были равны около 2 Бк/кг. Исследование вертикального распределения $^{239+240}\text{Pu}$ в донных осадках позволило выявить, что преобладающая доля плутония в осадках озер сформирована плутонием глобальных радиоактивных выпадений. Эти данные согласуются как с литературными данными по другим озерам в странах Европы и Азии [18], так и с ранее полученными нами результатами в черноморском регионе, которые показали, что плотность $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях глобального происхождения значительно выше, чем $^{239+240}\text{Pu}$ чернобыльского происхождения [15]. При этом озера характеризуются не только разными уровнями содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в осадках, но и разной глубиной залегания максимумов плутония (рис. 3, 4).

Относительно высокие уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в осадках оз. Сасык-Сиваш могут быть связаны с рядом особенностей этого водоема [22]. Это, прежде всего, наличие связи с Черным мо-

рем, большая площадь водосбора, большое количество балок (шесть) и сухоречий, доставляющих талую воду, поверхностные воды в осенне-зимний сезон дождей или летние ливневые воды в озеро. Кроме того, влияние может оказывать также интенсивное развитие планктонных водорослей, которые имеют высокую аккумуляционную способность в отношении плутония, и после отмирания седиментируют в донные отложения, самоосаждение солей, пересыхание части акватории в летний период и другие биогеохимические процессы в водоеме.

Менее глубокое положение в донных отложениях максимума плутония глобального происхождения в оз. Джарылгач по сравнению с оз. Сасык-Сиваш, вполне объяснимо более низкой скоростью осадконакопления, по сравнению с оз. Сасык-Сиваш. Это может быть связано с малым количеством балок, по которым в озеро поступают воды поверхностного стока (2), большой ролью пресных подземных источников и морских фильтрационных вод в питании озера [22], что требует дальнейших исследований.

Наблюдавшаяся размытость вертикального профиля и заглубленность $^{239+240}\text{Pu}$ чернобыльского происхождения в оз. Чокрак может быть связана с относительно более высокой скоростью осадконакопления в озере. Причиной этого может быть также то, что в озеро впадает две реки, и в период снеготаяния, осенне-зимний сезон обильных осадков и во время летних ливней поступают поверхностные воды по нескольким балкам [22]. Эти воды способствуют поступлению алохтонного взвешенного вещества в озеро. Существенное влияние имеет то, что озеро мелководное, богато лечебными грязями и подвержено обильному стихийному туризму. Стихийное использование грязей ведет к механическому перемешиванию осадков, что приводит к нарушению естественной исходной структуры профиля.

Изучение уровней содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в воде озер на примере озер Джарылгач и Кызыл-Яр позволило установить, что удельная активность радиоизотопов плутония $^{239+240}\text{Pu}$ в воде озер превышала таковую в черноморских прибрежных акваториях в 14–35 раз. В черноморских водах в прибрежных районах Крыма в этот период концентрация активности плутония составляла 0.41–0.53 мБк/м³ [15]. В оз. Джарылгач удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в воде в 2.5 раза ниже, чем в оз. Кызыл-Яр. Это может быть связано как с более высокой соленостью воды оз. Джарылгач, так и с его водным питанием, значительную часть которого составляют подземные пресные источники, фильтрационные морские воды, а также и с другими особенностями водосборных бассейнов этих озер, что требует дальнейших исследований.

Сравнение аккумуляционной способности донных отложений исследованных крымских озер и осадков Черного моря свидетельствует, что их K_n ($^{239+240}\text{Pu}$) более чем на порядок величин ниже, по сравнению с K_n ($^{239+240}\text{Pu}$) прибрежных черноморских донных отложений. У крымских берегов K_n ($^{239+240}\text{Pu}$) = 2×10^6 кг/кг [15, 23]. Следовательно, при достаточно высокой способности донных отложений озер накапливать плутоний, биогеохимические условия в крымских озерах способствуют более низким уровням его накопления, чем в Черном море. В результате совокупности условий в озерах, в конечном счете, сформировались абсолютные значения концентрации активности $^{239+240}\text{Pu}$ в донных осадках озер существенно более низкие, чем в черноморских донных осадках.

Согласно полученным результатам исследований, современные уровни удельной активности радиоизотопов плутония в воде озер составляли 6.6–16.5 мБк/м³, а удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностных донных отложениях крымских соленых озер составляла 0.024–0.516 Бк/кг (табл. 1, рис. 3, 4). По существующим санитарно-гигиеническим нормам [24] уровень вмешательства для питьевой воды составляет 550 Бк/м³, что на 4–5 порядков величин выше уровня содержания плутония в воде озер. Если оценить количество радиоизотопов плутония в 1 кг добываемой соли при условии 100% соосаждения плутония в соль при садке соли или при выпаривании воды, то килограмм соли будет содержать от 20 до 363 мкБк $^{239+240}\text{Pu}$, в зависимости от уровня содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и уровня солености водоема. Сравнивая полученные величины с критерием ограничения потребления продуктов питания по уровню А, равному для $^{239,240}\text{Pu}$ 10 Бк/кг (ограничение потребления продукта не требуется) [24], можно сказать, что ожидаемая удельная активность добываемой соли в отношении $^{239+240}\text{Pu}$ будет на 6–7 порядков величин ниже санитарно-гигиенического критерия. Для донных отложений уровни вмешательства не указаны в нормативных документах, но сравнение существующих уровней содержания радиоизотопов плутония в лечебных грязях с вышеуказанным критерием свидетельствует, что уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в озерных грязях почти в 20 раз ниже этого критерия. Согласно литературным данным, проявление медицинских последствий поступления в организм взрослого человека радиоизотопов плутония (возможное учащение онкологических заболеваний по сравнению с фоновым уровнем) может наблюдаться при поступлении 300–600 Бк/организм [25]. Если допустить, что весь плутоний из иловых грязей через кожу поступает в организм человека (что заведомо является преувеличением) и за курс лечения человек прини-

мает 10 процедур грязевых аппликаций по 3 кг, то количество поступивших радиоизотопов плутония $^{239+240}\text{Pu}$ не превысит 16 Бк/организм. Это в 19–37 раз ниже уровня, способного вызвать возможные негативные последствия для здоровья человека. Исходя из данных оценки радиационного риска для человека от поступления ^{239}Pu через поврежденные кожные покровы, следует, что одноразовое поступление 2 кБк ^{239}Pu через поврежденную кожу не увеличивает риск выше допустимого уровня в течение 25 последующих лет, согласно предложенной модели расчета риска [26]. Это указывает на безопасное применение грязей, даже если лечебные курсы грязевых аппликаций будут проводиться не один год. Следовательно, в исследованных соленых озерах уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных осадках не превышают безопасные уровни и озера могут использоваться в качестве терапевтического или сырьевого ресурса. При этом следует отметить, что в современной радиоэкологической ситуации для уровней радиоизотопов плутония в донных отложениях отличие от допустимых санитарно-гигиенических критериев на 3–4 порядка величин меньше, чем для таковых в воде озер.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в исследованных соленых озерах Крыма уровень содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в воде составлял 6.6–16.5 мБк/м³. При этом в оз. Джарылгач удельная активность радиоизотопов плутония $^{239+240}\text{Pu}$ в воде в 2.5 раза ниже, чем в оз. Кызыл-Яр. Уровень удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в воде исследованных соленых озер Крыма в современный период превышает таковой в черноморских прибрежных акваториях в 14–35 раз.
2. Определено, что уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностном слое 0–5 см донных отложений соленых озер Крыма сильно варьировали и изменялись в пределах 0.024–0.516 Бк/кг и были ниже, чем в черноморских донных отложениях.
3. В исследованных озерах уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в воде не превышают установленные санитарно-гигиенические нормы, а уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях значительно ниже уровней, которые согласно оценкам риска могут вызвать негативные последствия в организме человека, поэтому озерная вода и осадки могут использоваться в качестве терапевтического или сырьевого ресурса.
4. В донных отложениях озер из разных географических групп с возрастанием солености изменение удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ не имело односторонней тенденции. В пределах же каждой географической группы соленых озер с

возрастанием солености вод наблюдали возрастание удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях.

5. Проведена количественная оценка аккумуляционной способности донных осадков озер в отношении плутония. Для донных осадков озер коэффициенты накопления K_n ($^{239+240}\text{Pu}$) равнялись $n \times 10^4$ кг/кг, но были ниже, чем коэффициенты накопления Pu черноморскими донными осадками (K_n ($^{239+240}\text{Pu}$) = $n \times 10^6$ кг/кг) [15]. При достаточно высокой способности донных отложений накапливать $^{239+240}\text{Pu}$ биогеохимические условия в озерах приводят к более низким уровням накопления плутония в донных отложениях озер, чем в Черном море.

6. Показано, что при изучении вертикального распределения удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в ядрах осадков озер, там, где были обнаружены максимумы радиоизотопов плутония глобального и чернобыльского происхождения, большая доля $^{239+240}\text{Pu}$ представлена плутонием глобального происхождения. Данные по вертикальному распределению $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu и отношению удельных активностей $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ свидетельствуют о наличии индивидуальной истории и интенсивности поступления радиоизотопов плутония в разных озерах.

7. Установлено, что уровни удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях озер отличаются как между четырьмя ресурсными группами крымских озер, так и внутри групп. Глубина залегания слоя донных отложений с антропогенными радиоизотопами плутония в разных озерах ограничивалась 15–35 см осадка. В оз. Чокрак этот слой простирался глубже 30 см. Разные условия в озерах и их водосборных бассейнах оказывают влияние на формирование уровней и глубины залегания радиоизотопов плутония в осадках озер. Это приводит к индивидуальным количественным показателям уровней и перераспределению радиоизотопов плутония в каждом озере и в каждой группе бальнеогрязевых ресурсов крымских озер, что указывает на необходимость дальнейших исследований радиоэкологии соленых озер Крыма.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования в соленых озерах Крыма выполнены при поддержке гранта РФФИ проект № 16-05-00134 “Биогеохимические процессы, определяющие радиохемозоологическое и экотоксикологическое состояние соленых озер Крыма и возможности использования их биоресурсов”. Работы в Черном море выполнены по теме государственного задания ФГБУН ИМБИ “Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем”, номер гос. регистрации АААА-А18-118020890090-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трансурановые элементы в окружающей среде / Под ред. Р.М. Алексахина. М.: Энергоатомиздат, 1985. 344 с. [Transuranovye elementi v okruzhayushchei srede / Ed. R.M. Aleksakhin. M.: Energoatomizdat, 1985. 344 p. (in Russian)]
2. Чернобыльская катастрофа / Под ред. И.Г. Барьяхтара. Киев: Наук. думка, 1995. 473 с. [Chernoyil'skaya katastrofa / Pod red. V.G. Baryahrtara. Kiev: Naukova dumka, 1995, 473 p. (in Russian)]
3. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б. и др. Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г.Г. Поликарпова и В.Н. Егорова. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. 667 с. [Polikarpov G.G., Egorov V.N., Gulin S.B. i dr. Radioekologicheskij otklik Chernogo morja na chernobyl'skuyu aviariyu / Eds G.G. Polikarpov, V.N. Egorov. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2008, 667 p. (in Russian)]
4. Плутоний. Фундаментальные проблемы. Т. 1, 2: Пер. с англ. / Под ред. Б.А. Надытко, Л.Ф. Тимофеевой. Саров: ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, 2003. 498 с. [Plutoniy. Fundamentalnyye problemy. V. 1, 2: Per. s angl. / Pod red. B.A. Nadytko., L.F. Timofeevoy. Sarov: FGUP “RFYaTs-VNIIEF”, 2003, 498 p. (in Russian)]
5. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля / Под ред. Ф. Уорнера, Р.М. Харрисона. М.: Мир, 1999. 511 с. [Puty migratsii iskustvennikh radionuklidov v okruzhayushchei srede. Radioekologiya posle Chernobylya / Eds F. Warner, R.M. Harrison. M.: Mir, 1999, 511 p. (in Russian)]
6. Трапезников А.В. ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ в пресноводных экосистемах. Екатеринбург: АкадемНаука, 2010. 510 с. [Trapeznikov A.V. ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs i $^{239,240}\text{Pu}$ v presnovodnykh ekosystemakh. Ekaterinburg: AkademNauka, 2010, 510 p. (in Russian)]
7. Терещенко Н.Н. Ведущая роль донных отложений в перераспределении плутония в черноморских экосистемах // Наукові праці: науково-методичний журнал. Техногенна безпека. 2011. Т. 169. Вип. 157. С. 63–70. [Tereshchenko N.N. Vedushchaya rol donnykh otlozhenij v pereraspredelenii plutoniya v chernomorskikh ekosystemakh // Naukovi prazi: naukovometodichij zhurnal. Tekhnogenna bezpeka, 2011. V. 169. Iss. 157. P. 63–70. (in Russian)]
8. Понизовский А.М. Соляные ресурсы Крыма. Киев: Крым, 1965. 164 с. [Ponizovskiy A.M. Solyanyie resursyi Krima. Kiev: Krim, 1965, 164 p. (in Russian)]
9. Пасынков А.А., Соцкова Л.М., Чабан В.В. Экологические проблемы сохранения и использования бальнеологических ресурсов соленых озер Крыма // Ученые записки ТНУ им. В.И. Вернадского. Сер. “География”. 2014. Т. 27 (66). № 3. С. 96–116. [Pasinikov A.A., Sozkova L.M., Chaban V.V. Ekologicheskie problem sokhraneniya i ispolzovaniya balneologicheskikh resursov solenikh ozer Krima // Uchenie zapiski TNU im. V.I. Vernadskogo. Ser. “Geografiya”. 2014. V. 27 (66). № 3. P. 96–116. (in Russian)]
10. Шадрин Н.В., Сергеева Н.Г., Латушкин А.А. и др. Трансформация залива Сиваш (Азовское море) в условиях роста солености: изменения мейобентоса

- и других компонент экосистемы (2013–2015 гг.) // Журн. Сибирского федерального университета. Серия “Биология”. 2016. Т. 9. № 4. С. 452–466. [Shadrin N.V., Sergeeva N.G., Latushkin A.A. et al. Transformaziya zaliva Sivash (Azovskoe more) v usloviyach rosta solenosti: izmeneniya mejobentosa I drugikh component ekosystemi (2013–2015) // Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya “Biologiya”, 2016. V. 9. № 4. P. 452–466. (in Russian)]
11. Соцкова Л.М., Смирнов В.О., Окара И.В., Малищук И.О. Сохранение бальнеологических ресурсов грязевых соленых озер западного Крыма // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 7 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56691> [дата обращения: 29.07.2018]. [Sotskova L.M., Smirnov V.O., Okara I.V., Malishchuk I.O. Sokhranenie balneologicheskikh resursov gryazevyikh solenykh ozer zapadnogo Krima // Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii. 2015. № 7. [Electronic resource]. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56691> [accessed 29.07.2018]. (in Russian)]
 12. Олиферов А.Н., Тимченко З.В. Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 216 с. [Olipherov A.N., Timchenko Z.V. Reky i ozero Krima. Simferopol: Dolya, 2005, 216 p. (in Russian)]
 13. IAEA. Measurement of Radionuclides in Food and the Environment. Technical Report Series No. 295. Viena: IAEA, 1989. 182 p.
 14. Wong K.M., Jokela T.A., Noshkin V.E. Radiochemical procedures for analysis of Pu, Am, Cs and Sr in water, soil, sediments and biota samples. Lawrence, Livermore: National Laboratory Livermore. 1994. 19 p.
 15. Tereshchenko N.N., Gulin S.B., Proskurnin V.Yu. Distribution and migration of $^{239+240}\text{Pu}$ in abiotic components of the Black Sea ecosystems during the post-Chernobyl period // J. Environ. Radioact. 2018. V. 188. P. 67–78.
 16. Aarkrog A. The radiological impact of the Chernobyl debris compared with that from nuclear weapons fallout // J. Environ. Radioact. 1988. V. 6. P. 151–162.
 17. Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю., Параскив А.А., Чузжикова-Проскурнина О.Д. Источники и уровни загрязнения соленых озер Крыма антропогенными долгоживущими радионуклидами плутония в постчернобыльский период // Сб. статей по материалам науч.-практ. конф. с междунар. участием “Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность–2017” (11–15 сентября 2017 г.) / Под ред. Ю.А. Омельчук, Н.В. Ляминой, Г.В. Кучерик. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 1331–1337. [Tereshchenko N.N., Proskurnin V. Yu., Paraskiv A.A., Chuzhikova-Proskurnina O.D. Istochniki i urovni zagryazneniya solenykh ozer Krima antropogennymi dolgozhivushchimi radioizotopami plutoniya v postchernobyl'skij period // Sb. statei po materialam nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem “Ekologicheskaya, promishlennaya i energeticheskaya bezopasnost – 2017” (11–15 sentyabrya 2017) / Eds Yu.A. Omelchuk, N.V. Lyamina, G.V. Kucherik. Sevastopol: SevGU, 2017. P. 1331–1337. (in Russian)]
 18. Tereshchenko N.N., Proskurnin V.Yu., Paraskiv A.A., Chuzhikova-Proskurnina O.D. The man-made plutonium radioisotopes in the salt lakes of the Crimean peninsula // J. Oceanol. a Limnol. 2018. V. 36. № 6. P. 1917–1929.
 19. Sanchez Arthur L., Gastaud J., Noshkin V. et al. Plutonium oxidation states in the southwestern Black Sea: evidence regarding the origin of the cold intermediate layer // Deep Sea Res. 1991. V. 38. Suppl. 2. P. S845–S853.
 20. Лисовский А.А., Новик В.А., Тимченко З.В., Мустафаева З.Р. Поверхностные водные объекты Крыма (справочник). Симферополь: Рескомводхоз АРК, 2004. 114 с. [Lisovskij A.A., Novik V.A., Timchenko Z.V., Mustafaeva Z.R. Poverkhnostnie vodnie ob'ekti Krima (spravochnik). Simferopol: Reskomvodkhaz ARK, 2004. 114 p. (in Russian)]
 21. Поликарпов Г.Г. Радиоэкология морских организмов / Под ред. В.П. Шведова. М.: Атомиздат, 1964. 295 с. [Polikarpov G.G. Radioekologiya morskikh organizmov / Ed. V.P. Shvedov. M.: Atomizdat, 1964. 295 p. (in Russian)]
 22. Tereshchenko N.N., Trapeznikov A.V., Paraskiv A.A. et al. Features of the Plutonium Radionuclides Distribution in the Salt Lakes of the Crimean Peninsula // INSINUME 2019: 8th Int. Symp. of In Situ Nuclear Metrology as a tool for radioecology, 23–26 April 2019, Richmond Ephesus Resort, Kusadasi-Turkey: Full Text Book. [Kusadasi], Turkey, 2019. P. 98–101.
 23. Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю., Гулин С.Б., Крылова Т.А. Радиоэкологический мониторинг плутония в донных отложениях севавтопольских бухт // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 289–293. [Tereshchenko N.N., Proskurnin V.Yu., Gulin S.B., Krilova T.A. Radioekologicheskij monitoring plutoniya v donnikh otlozheniyakh sevastopolskikh buhht // Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoj i shelfovoj zon i kompleksnoe ispolzovanie resursov shelfa. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2013. Iss. 27. P. 289–293. (in Russian)]
 24. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с. [Normi radiatsionnoi bezopasnosti (NRB-99/2009): Sanitarnie pravila i normativi SanPiN 2/6/1/2523-09. M.: Federal'nii tsentr gigieni i epidemiologii Rospotrebнадзора, 2009. 100 p. (in Russian)]
 25. Василенко И.Я., Василенко О.И. Плутоний. // Энергия: экономика, техника, экология. 2004. № 1. С. 60–63. [Vasilenko I.Ya., Vasilenko O.I. Plutonii // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. 2004. № 1. P. 60–63. (in Russian)].
 26. Сокольников М.Э., Василенко Е.К., Юркин А.М. и др. Нормирование радиационного воздействия ^{239}Pu при поступлении через поврежденные кожные покровы // Радиация и риск. 2016. Т. 25. № 2. С. 109–119. [Sokolnikov M.E., Vasilenko E.K., Yurkin A.M. et al. Normirovanie radiatsionnogo vozdeistviya ^{239}Pu pri postuplenii cherez povrezhdenne kozhnie pokrovi // Radiatsiya i risk. 2016. V. 25. № 2. P. 109–119. (in Russian)]

Modern Levels of Long-lived Radioisotopes of Plutonium in Bottom Sediments of Salt Lakes of the Crimea

N. N. Tereshchenko^{a,#}, A. V. Trapeznikov^b, A. A. Paraskiv^a, V. Yu. Proskurnin^a, and A. P. Plataev^b

^a*Federal Research Center "A.O. Kovalevsky Institute of Biology of Southern Seas of RAS", Sevastopol, Russia*

^b*Institute of Plant and Animal Ecology of RAS, Ekaterinburg, Russia*

[#]*E-mail: ntereshchenko@yandex.ru*

Data on the plutonium alpha-emitting radioisotopes levels in the surface bottom sediments of ten salt lakes of the Crimea from different geographical groups are presented. Profiles of the vertical distribution of these radioisotopes in the cores of bottom sediments to a depth of 25–30 cm in lakes from these groups of balneary mud resources of the Crimean lakes were obtained. The highest values were noted in the 10–15 cm layer in the Lake Sasyk-Sivash (2 Bq/kg). The plutonium radioisotopes ^{239,240}Pu activity concentration in the water of these reservoirs was 6.6–16.5 mBq/m³. On the example of two lakes, it is shown that bottom sediments are characterized by high accumulative ability for plutonium radioisotopes. The ^{239,240}Pu concentration factor of bottom sediment reached values of the order of $n \times 10^4$ kg/kg. The main amount of plutonium in the bottom sediments of the investigated lakes was represented by plutonium radioisotopes of global origin.

Keywords: salt lakes of Crimea, plutonium radioisotopes — ^{238,239,240}Pu, bottom sediments, water, concentration factor, accident on the Chernobyl NPP, radioactive global fallout