ИМБИ - IMBR

Морской биологический журнал, 2019, том 4, № 2, с. 41–51
Marine Biological Journal, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 41–51
https://mbj.marine-research.org; doi: 10.21072/mbj.2019.04.2.05
ISSN 2499-9768 print / ISSN 2499-9776 online

УДК 546.798.22:551.35(285.32)(262.5)

СОДЕРЖАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ ПЛУТОНИЯ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СОЛЁНЫХ ОЗЁР КРЫМА В СРАВНЕНИИ С ПРИБРЕЖНЫМИ АКВАТОРИЯМИ ЧЁРНОГО МОРЯ

© 2019 г. **А. А. Параскив, Н. Н. Терещенко, В. Ю. Проскурнин**

Институт морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия
E-mail: *artem.paraskiv@mail.ru*

Поступила в редакцию 07.11.2018; после доработки 13.12.2018;
принята к публикации 22.05.2019; опубликована онлайн 24.06.2019.

Выполнена оценка уровней концентрации активности альфа-излучающих изотопов $^{239+240}$Pu в поверхностном слое (0–5 см) донных отложений десяти солёных озёр Крымского полуострова из четырёх географических групп. Установлено, что максимальные значения $^{239+240}$Pu характерны для донных осадков озёр морского происхождения из разных географических групп: оз. Кызыл-Яр — (419 ± 27), оз. Джарылгач — (443 ± 24), оз. Тобечикское — (451 ± 43) мБк·кг$^{-1}$ $^{239+240}$Pu. Наименьшие уровни зафиксированы в озёрах континентального происхождения из Перекопской группы: оз. Киятское — (24 ± 6), оз. Кирлеутское — (48 ± 4), оз. Красное — (95 ± 9) мБк·кг$^{-1}$ $^{239+240}$Pu. Сравнительный анализ концентрации активности $^{239+240}$Pu в поверхностном слое донных отложений показал, что в осадках прибрежных черноморских акваторий уровни $^{239+240}$Pu в среднем в 2 раза выше, чем в исследованных солёных озёрах западной части Крыма. Оценены дозовые нагрузки в илах поверхностного слоя соленых озёр. Показано, что мощности эквивалентных доз не превышали диапазон мощностей доз от природного радиационного фона.

Ключевые слова: солёные озера Крыма, донные отложения, радионуклиды плутония $^{239+240}$Pu, Чёрное море

На территории Крымского полуострова известно около 300 солёных водоёмов, различающихся по химическому составу, минерализации и происхождению. Они располагаются группами, как правило вдоль берегов Чёрного и Азовского морей, и занимают часть Евпаторийско-Сакского и Тарханкутского плато, а также север Крыма и районы Керченского полуострова. Каждое из этих озёр в зависимости от его большей или меньшей связи с морем и преобладающего типа питания (морская вода либо вода поверхностного и подземного стока) относят к одной из двух больших генетических групп — к континентальной или морской [1]. Озёра континентальной группы представляют собой котловины, выработанные потоками воды, сильными ветрами или образовавшиеся в результате провалов и просадок участков суши. К этой группе относятся озёра Перекопской группы, а также, частично, Керченской; они питаются водами поверхностного и подземного стока. Для питания озёр морской группы большее значение имеет близость к акваториям Чёрного или Азовского моря, с которыми они соединяются либо напрямую протоками, либо сплошными пересыпями, через которые происходит слабая фильтрация морской воды в озёрные котловины. Также морские воды могут прорываться через пересыпи в условиях штормовой погоды. Большинство окраинных солёных озёр Крыма имеет морское происхождение.

Многие солёные озёра Крымского полуострова с конца XIX века используют для добычи поваренной соли и соды, а также брома и хлористого магния — важных компонентов химической промышленности [6]. Кроме того, донные отложения солёных озёр применяют в бальнеологических санаториях в качестве лечебных грязей [7].

Вследствие испытаний ядерного оружия в открытых средах (наиболее мощные взрывы — 1962–1963 гг.), а также аварии на Чернобыльской АЭС (1986), Чёрное море и экосистемы Крымского полуострова подверглись радиационному загрязнению [5]. В современный период в регионе одними из основных дозообразующих техногенных радиоизотопов, попавших в окружающую среду, являются, наряду с ^{90}Sr и ^{137}Cs, альфа-излучающие изотопы $^{239+240}$Pu.

С глобальными выпадениями на поверхность Земли поступило около 12 ПБк $^{239+240}$Pu [4]. Самая высокая плотность выпадений отмечена в северном полушарии на широтах 40–50°, где расположен в том числе и Крымский полуостров. Суммарную плотность выпадений радионуклидов плутония на поверхность солёных озёр Крыма до 1986 г. можно оценить по плотности выпадений на Чёрное море, составлявшей для $^{239+240}$Pu 81,4 Бк·м$^{-2}$ [5]. После аварии на ЧАЭС Крымский регион попал в зону «южного следа» — усиленных радиоактивных выпадений в мае 1986 г. В 1990-х гг. суммарная плотность выпадений $^{239+240}$Pu в Крыму составляла 0,1–0,2 кБк·м$^{-2}$ [10].

Периоды полураспада ^{239}Pu и ^{240}Pu — 24 400 и 6 620 лет соответственно, что существенно больше времени жизни биологических организмов. Эти радионуклиды попадают в экосистемы, и их активность в течение сотен лет практически не уменьшается за счёт радиоактивного распада. Она суммируется от разных источников. В процессе перераспределения плутония в различные компоненты экосистем формируется долговременный хронический техногенный радиоэкологический фактор.

Основное депо для радиоизотопов плутония как в морских, так и в пресноводных водоёмах — донные отложения [9, 14], поэтому ключевой объект нашего исследования — именно донные отложения солёных озёр. Учитывая их использование в лечебных и косметических целях, важно не только изучить уровни концентраций активности радионуклидов плутония в осадках, но и оценить возможные дозовые нагрузки на живые организмы при непосредственном контакте с осадками от ионизирующей радиации, излучаемой радиоизотопами. Ранее таких исследований в солёных озёрах Крыма не проводили.

Цель работы — определение уровней концентрации активности $^{239+240}$Pu в поверхностном слое (0–5 см) донных отложений десяти солёных озёр Крыма и их сравнительный анализ с уровнями концентрации в донных осадках смежных прибрежных районов Чёрного моря, а также оценка уровня дозовых нагрузок от ионизирующего излучения $^{239+240}$Pu в донных осадках.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены в десяти солёных водоёмах из четырёх географических групп озёр Крымского полуострова [3] (рис. 1) морского (I, II, IV группы) и континентального (III группа) происхождения [1]. Пробы поверхностного слоя (0–5 см) донных отложений отбирали в экспедициях 2016 г. с помощью специального пробоотборника — акриловой трубки, имеющей диаметр 57 мм, с вакуумным затвором. Образцы черноморских донных осадков отбирали в морских экспедициях на НИС «Профессор Водяницкий». Параллельно с отбором проб в озёрах осуществляли измерения физико-химических параметров воды [pH, солёность, редокс-потенциал (Eh)]. Для определения pH и Eh использовали портативные тестеры pH-911 (точность измерений — ±0,1 ед. pH) и ORP-16911 (точность измерений — ±5 мВ) соответственно. Солёность воды измеряли портативным рефрактометром Kelilong RHS-10BATC (точность измерений — ±1 ‰). После высушивания осадков до постоянного веса по общепринятой методике рассчитывали их влажность, а после термической обработки оценивали долю органического вещества в них [5].

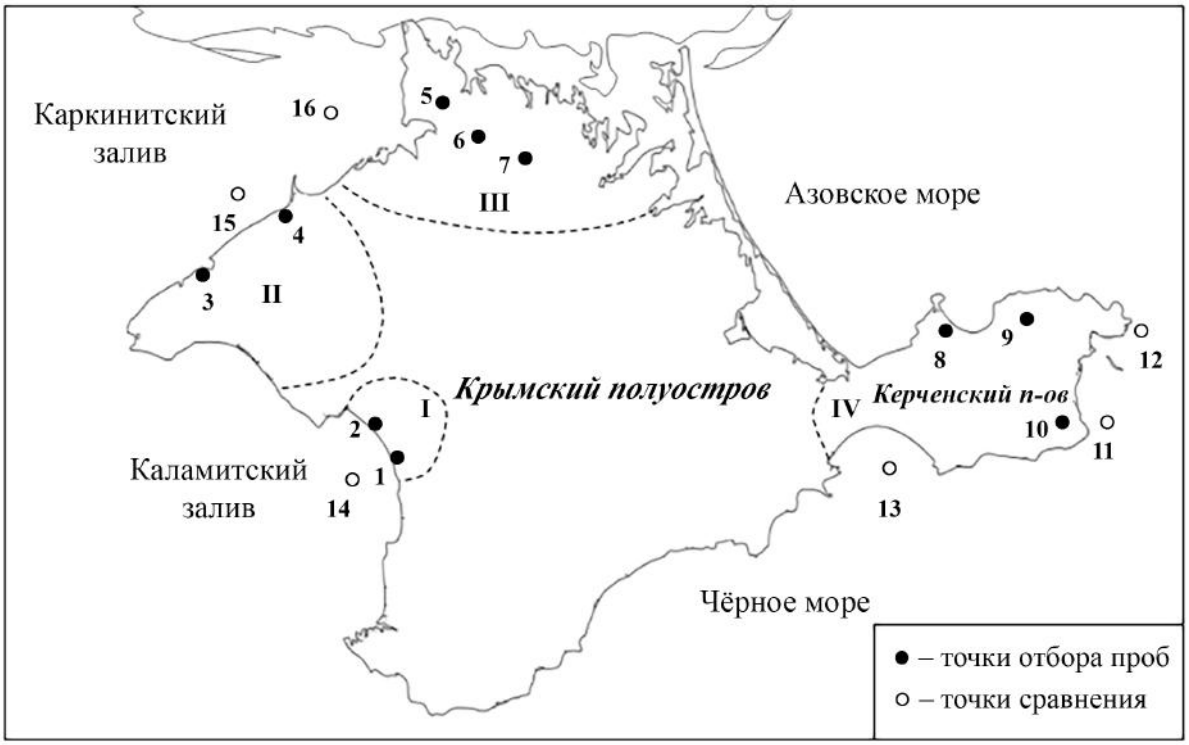

Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб в солёных озёрах Крыма. Евпаторийская группа (I): 1 — оз. Кызыл-Яр; 2 — оз. Сасык-Сиваш. Тарханкутская группа (II): 3 — оз. Джарылгач; 4 — оз. Бакальское. Перекопская группа (III): 5 — оз. Красное; 6 — оз. Киятское; 7 — оз. Кирлеутское. Керченская группа (VI): 8 — оз. Акташское; 9 — оз. Чокракское; 10 — оз. Тобечикское. Точки сравнения в Чёрном море: 11 — южная часть Керченского пролива; 12 — северная часть Керченского пролива; 13 — Феодосийский залив; 14 — Каламитский залив; 15 — Каркинитский залив (илы); 16 — Каркинитский залив (песок)

Fig. 1. The map of sampling in Crimean salt lakes. Yevpatoriya group (I): 1 – Kyzyl-Yar; 2 – Sasyk-Sivash. Tarkhankut group (II): 3 – Dzharylhach; 4 – Bakal. Perekop group (III): 5 – Krasnoye; 6 – Kiyat; 7 – Kirleut. Kerch group (IV): 8 – Aktash; 9 – Chokrak; 10 – Tobechik. The reference points in the Black Sea: 11 – south part of the Kerch Strait; 12 – north part of the Kerch Strait; 13 – Feodosiya Gulf; 14 – Kalamite Gulf; 15 – Karkinite Gulf (mud); 16 – Karkinite Gulf (sand)

В лаборатории пробы высушивали, гомогенизировали, а затем подвергали высокотемпературной и радиохимической обработке. Последняя включала двухступенчатую очистку и выделение радионуклидов плутония при помощи колоночной хроматографии на ионообменных смолах с предварительным внесением стандартного раствора ^{242}Pu — трассера химического выхода плутония [12, 13] (рис. 2).

Далее посредством электролитического осаждения плутония на диски из нержавеющей стали изготавливали тонкослойные счётные образцы [15], которые затем измеряли на альфа-спектрометрическом комплексе EG&G ORTEC OCTETE PC BERTHOLD-WALLAC. Результаты определения суммарной концентрации активности $^{239+240}$Pu в донных отложениях представлены в мБк·кг$^{-1}$ сухой массы осадка. Ошибка измерения $^{239+240}$Pu не превышала 10 %; только для пробы из оз. Киятское ошибка составила 25 %. Мощности доз от ионизирующего излучения радионуклидов плутония оценивали по общепринятой методике [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные позволили определить концентрации активности радионуклидов $^{239+240}$Pu в поверхностном слое донных отложений десяти солёных озёр Крыма из разных географических групп (рис. 3). Уровни концентрации активности изучаемых изотопов варьировали как между территориальными группами, так и между водоёмами в пределах одной группы. На рис. 3 также

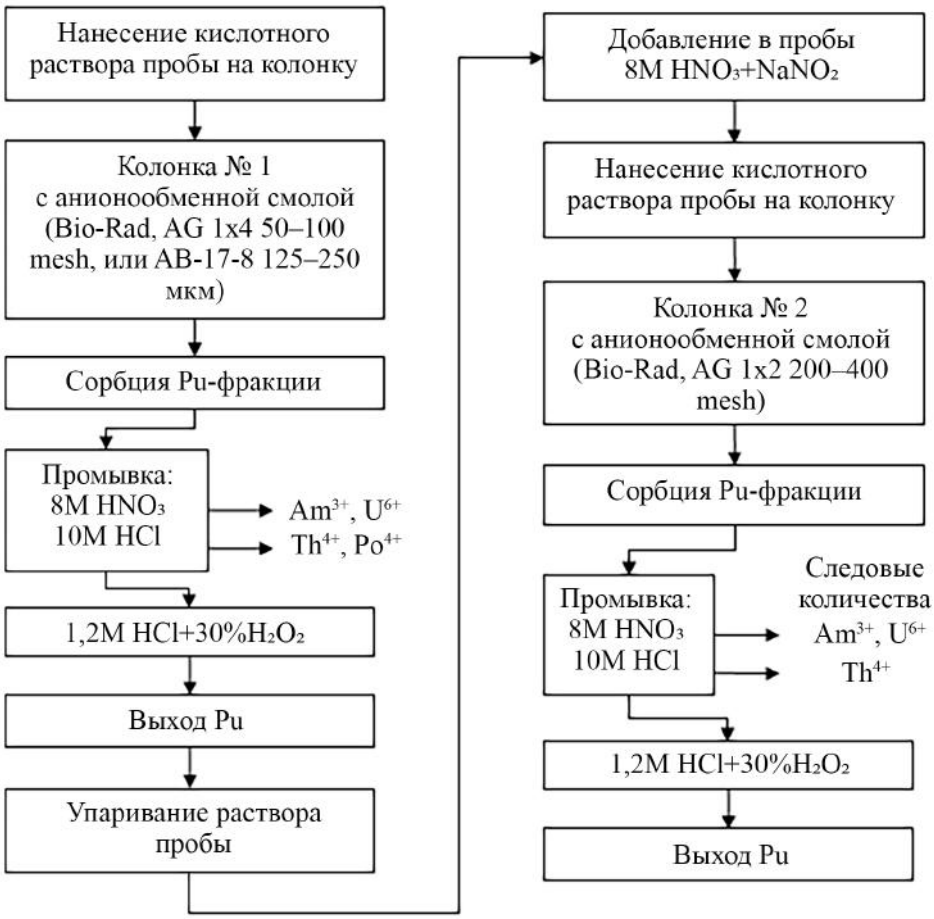

Рис. 2. Схема двухступенчатой очистки и выделения плутония при помощи колоночной ионообменной хроматографии

Fig. 2. The scheme of two-stage purification and separation of plutonium by column ion exchange chromatography

показаны результаты исследований в Каркинитском, Каламитском и Феодосийском заливах Чёрного моря и в Керченском проливе [14], то есть в прибрежных морских районах, прилегающих к месту расположения солёных озёр.

Изучаемые озёрные и морские экосистемы характеризуются различными уровнями содержания плутония в поверхностном слое донных осадков. Так, в Каламитском заливе концентрации плутония в 1,6–2,4 раза больше, чем в солёных озёрах Евпаторийской группы (Кызыл-Яр и Сасык-Сиваш), расположенных на побережье залива.

В Тарханкутской группе исследованы озёра Джарылгач и Бакальское. Значения концентрации активности в них отличаются практически в 9 раз, составляя (443 ± 24) и (49 ± 6) мБк·кг$^{-1}$ соответственно, из-за разного гранулометрического состава осадков (илистые и песчанистые соответственно). Анализ данных, полученных в пробах из Каркинитского залива, свидетельствует о том, что в черноморских илистых донных осадках концентрации активности плутония находились в пределах (815 ± 81) мБк·кг$^{-1}$, а в песчанистых осадках — (95 ± 9) мБк·кг$^{-1}$.

Следовательно, различия в значениях концентрации активности $^{239+240}$Pu в озёрах Тарханкутской группы связаны, как и в водоёмах Каркинитского залива, с гранулометрическим составом осадков. Уровни накопления $^{239+240}$Pu, характерные для илистых осадков, на порядок выше уровней, характерных для песчанистых донных отложений, как в озёрах, так и в морских акваториях. В озёрах уровни $^{239+240}$Pu в илистых и песчанистых донных отложениях почти в 2 раза ниже, чем в прилегающих морских акваториях (рис. 3).

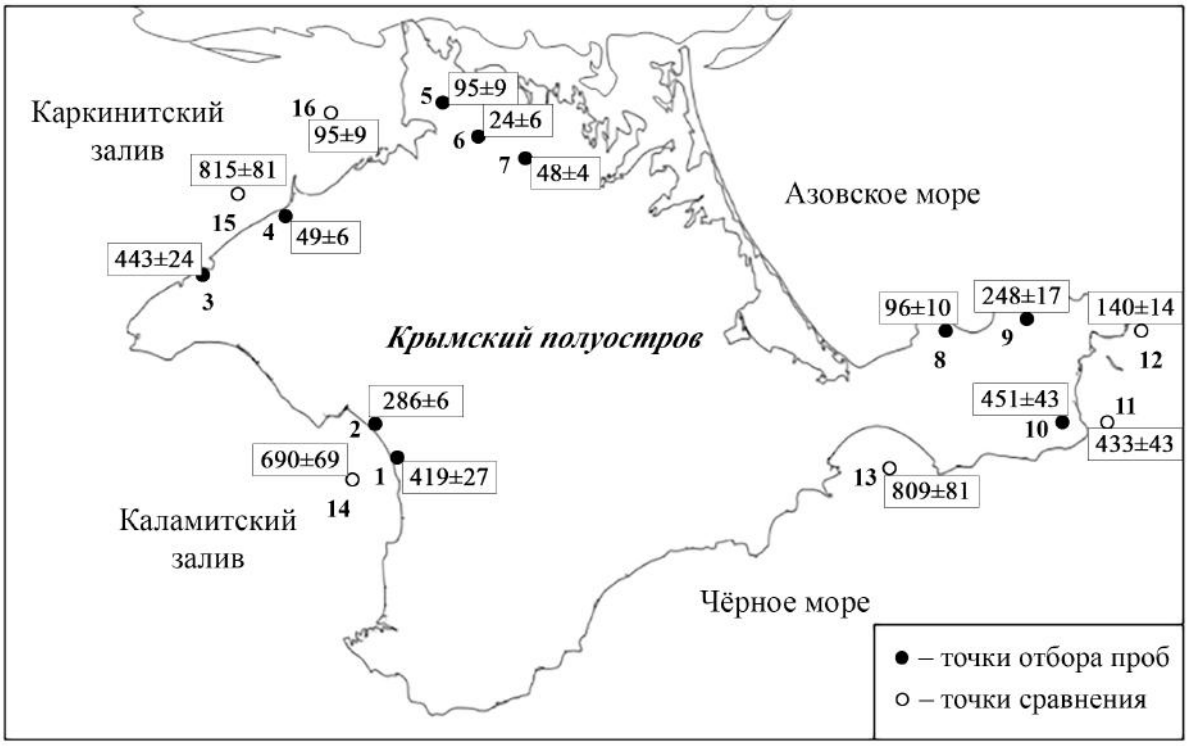

Рис. 3. Концентрации активности $^{239+240}$Pu (мБк·кг$^{-1}$) в поверхностном слое (0–5 см) донных отложений солёных озёр Крыма и в точках сравнения в Чёрном море и Керченском проливе (названия озёр и точек сравнения приведены в подписи к рис. 1)

Fig. 3. Activity concentration of $^{239+240}$Pu (mBq·kg^{-1}) in the surface layer (0–5 cm) of the bottom sediments in Crimean salt lakes and in the reference points in the Black Sea and the Kerch Strait (for the names of the lakes and the reference points see Fig. 1)

Для донных осадков озёр Перекопской группы характерны самые низкие концентрации активности плутония среди донных осадков озёр всех географических групп (24–95 мБк·кг$^{-1}$), что связано, вероятно, с континентальным происхождением этих озёр.

Наибольшие уровни плутония в донных осадках озёр Керченской группы характерны для оз. Тобечикское (451 мБк·кг$^{-1}$), которое находится на побережье Керченского пролива со стороны Чёрного моря. В озёрах Чокракское и Акташское, расположенных на побережье Азовского моря, уровни $^{239+240}$Pu в 1,8–4,7 раза ниже, чем в оз. Тобечикское. Вместе с тем оз. Тобечикское находится на побережье южной части Керченского пролива, на границе его соединения с Чёрным морем, где в донных осадках уровень изотопов $^{239+240}$Pu был равен 433 мБк·кг$^{-1}$, тогда как в северной части пролива, у границы с Азовским морем, он составлял 140 мБк·кг$^{-1}$. Это может говорить о различиях между уровнями концентрации активности $^{239+240}$Pu в донных осадках северо-восточной части Чёрного моря и южной части Азовского, что могло обусловить разницу в уровнях содержания плутония в озёрах. Вопрос требует дополнительного изучения, поскольку радиоэкологические исследования в отношении $^{239+240}$Pu в южной части Азовского моря ранее не проводили.

В целом максимальные значения концентрации активности радионуклидов плутония в поверхностном слое донных осадков наблюдали в озёрах морского происхождения из разных географических групп (рис. 1) — в озёрах Кызыл-Яр [(419 ± 27) мБк·кг$^{-1}$ $^{239+240}$Pu], Джарылгач [(443 ± 24) мБк·кг$^{-1}$ $^{239+240}$Pu] и Тобечикское [(451 ± 43) мБк·кг$^{-1}$ $^{239+240}$Pu] (рис. 3). Средние уровни изучаемых радионуклидов плутония в поверхностном слое донных отложений в озёрах Евпаторийской группы составили 353 мБк·кг$^{-1}$. Для озёр Тарханкутской и Керченской групп значения были ниже на 25–30 % (246 и 265 мБк·кг$^{-1}$ соответственно), а для озёр Перекопской группы — на 84 % (56 мБк·кг$^{-1}$ $^{239+240}$Pu).

В осадках прибрежных черноморских экосистем средние уровни плутония почти в 2 раза выше, чем в экосистемах исследованных солёных озёр в западной части Крыма. В озёрах Керченской группы различие менее выражено. Так, для связанного с Чёрным морем озера Тобечикское разница составила 1,3 раза, а для озёр азовоморского побережья — 0,8 раза. Различие в концентрации активности $^{239+240}$Pu в донных осадках крымских озёр на побережье Азовского моря и в приазовском районе Керченского пролива может быть обусловлено разным типом осадка в этих акваториях. Если в озёрах донные отложения представлены преимущественно илами, то в исследованном морском районе донные осадки отнесены к смешанному типу (алевритово-илисто-песчаный) [2]. Как известно, радионуклиды плутония интенсивнее накапливаются иловыми осадками [8]. Более высокие уровни концентрации активности $^{239+240}$Pu в черноморских исследованных прибрежных районах на западе Крыма можно объяснить влиянием вод северо-западной части Чёрного моря. В эти акватории в течение более продолжительного времени поступали радионуклиды плутония со стоком Дуная и Днепра. Эти реки имеют огромные водосборные бассейны, попавшие в зону влияния аварии на Чернобыльской АЭС, что привело к усиленному поступлению радионуклидов в черноморские донные осадки у западных берегов Крыма. На формирование более высокой концентрации активности плутония в Каркинитском заливе могли оказывать влияние днепровские воды, которые поступали туда до 2014 г. по руслу Северо-Крымского канала. С его водами плутоний мог поступать и в водные объекты Керченского полуострова. Между тем полученные данные о низких уровнях содержания плутония в верхнем слое (0–5 см) донных отложений в озёрах Перекопской группы свидетельствуют о том, что в последнее десятилетие Северо-Крымский канал не оказывал определяющего влияния на транспорт плутония в крымские водные экосистемы. Именно поэтому, вероятно, одним из значимых источников радионуклидов плутония для озёр были (в годы после атмосферных радиоактивных выпадений) воды Чёрного и Азовского моря.

Проведение измерений физико-химических параметров вод и донных отложений в исследуемых озёрах показало их широкую вариабельность (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химические характеристики вод и донных отложений исследуемых озёр

Table 1. Physical-chemical characteristics of the lake water and the bottom sediments

№	Название озера	pH вод	Редокс-потенциал вод, мВ	S вод, ‰	Влажность осадка, %	Доля органического вещества в осадке, %
1	Кызыл-Яр	$7,9 \pm 0,1$	150 ± 5	$4 \pm 0,1$	70 ± 1	12 ± 1
2	Сасык-Сиваш	$7,7 \pm 0,1$	66 ± 5	$280 \pm 2,8$	23 ± 1	12 ± 1
3	Джарылгач	$8,5 \pm 0,1$	170 ± 5	$115 \pm 1,2$	28 ± 1	6 ± 1
4	Бакальское	$8,6 \pm 0,1$	94 ± 5	$47 \pm 0,5$	13 ± 1	8 ± 1
5	Красное	$9,3 \pm 0,1$	133 ± 5	$330 \pm 3,3$	17 ± 1	15 ± 1
6	Киятское	$7,7 \pm 0,1$	125 ± 5	$200 \pm 2,0$	16 ± 1	11 ± 1
7	Кирлеутское	$7,9 \pm 0,1$	97 ± 5	$235 \pm 2,4$	19 ± 1	16 ± 1
8	Акташское	$8,5 \pm 0,1$	123 ± 5	$89 \pm 0,9$	29 ± 1	6 ± 1
9	Чокракское	$7,9 \pm 0,1$	-326 ± 5	$226 \pm 2,3$	34 ± 1	12 ± 1
10	Тобечикское	$8,2 \pm 0,1$	370 ± 5	$176 \pm 1,8$	36 ± 1	13 ± 1

Особый интерес вызывало возможное влияние солёности воды на аккумуляцию плутония осадками, так как солёность вод озёр существенно отличалась в разных водоёмах (диапазон значений — от (4 ± 0,1) до (330 ± 3,3) ‰). При этом достоверной корреляции между концентрацией активности радиоизотопов плутония и солёностью вод не обнаружено (рис. 4). Коэффициент корреляции между исследуемыми параметрами был равен -0,24, что говорит об очень слабой степени отрицательной корреляционной связи этих величин. Возможно, эту связь нивелировали некоторые климатические,

географические и молисмологические факторы. Имеет значение и тот факт, что массовые концентрации плутония в экосистемах озёр являются очень низкими, что отвечает условиям прямого влияния уровня самого плутония в воде на аккумуляционную способность осадков, а не повышенных концентраций других элементов в водной среде [9].

В поверхностных черноморских осадках со средней солёностью вод около 18 ‰ в прибрежных районах исследований уровни $^{239+240}$Pu были выше, чем в озёрах с более высокой солёностью (в 2,6–18,3 раза). Исключение — оз. Кызыл-Яр, где солёность была равна 4 ‰ (табл. 1).

Вероятно, на аккумуляцию плутония донными отложениями оказывал влияние окислительно-восстановительный потенциал водной среды; значения показателя находились в широком диапазоне — от +370 до -326 мВ (табл. 1). Плутоний — поливалентный элемент, и степень его окисления зависит от окислительно-восстановительного потенциала среды [4], что влияет, в свою очередь, на сродство плутония к частицам взвеси, с оседанием которых плутоний и поступает в донные осадки водоёмов. Отрицательный редокс-потенциал вод способствует увеличению этого сродства; именно данное обстоятельство может служить причиной более высоких уровней $^{239+240}$Pu в Чоркакском озере, чем в Акташском, хотя оба расположены на берегу Азовского моря (табл. 1).

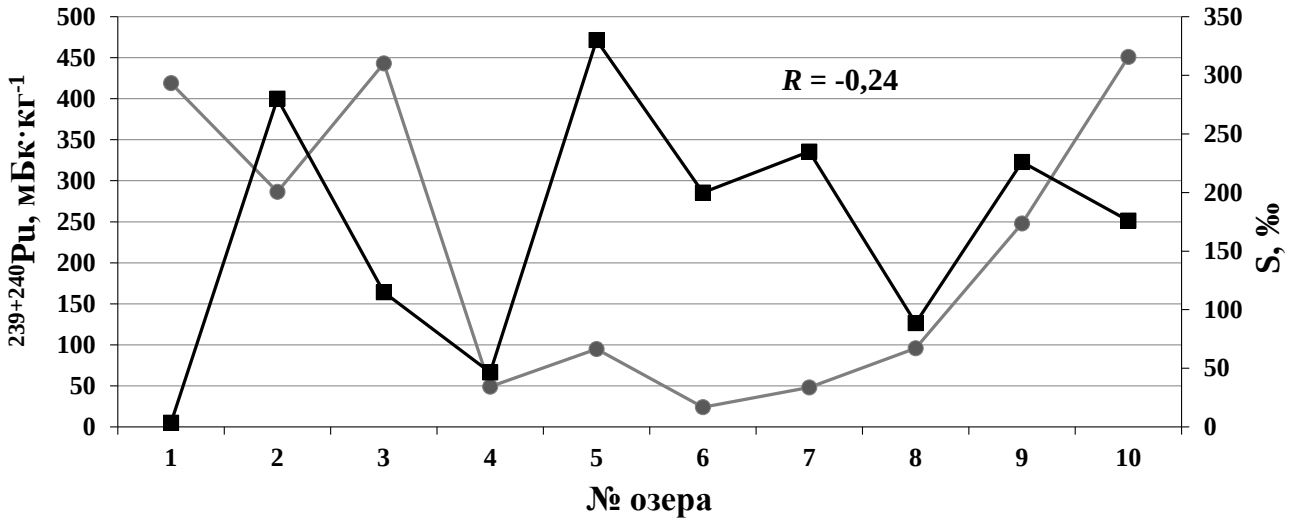

Рис. 4. Концентрация активности изотопов $^{239+240}$Pu (серая линия с круглыми маркерами) при разной солёности (S) воды (чёрная линия с квадратными маркерами) в исследуемых озёрах: 1 — Кызыл-Яр; 2 — Сасык-Сиваш; 3 — Джарылгач; 4 — Бакальское; 5 — Красное; 6 — Киятское; 7 — Кирлеутское; 8 — Акташское; 9 — Чокракское; 10 — Тобечикское. *R* — коэффициент корреляции

Fig. 4. Activity concentration of isotopes $^{239+240}$Pu (gray line with round markers) against different salinity (S) of water (black line with square markers) in salt lakes: 1 – Kyzyl-Yar; 2 – Sasyk-Sivash; 3 – Dzharylhach; 4 – Bakal; 5 – Krasnoye; 6 – Kiyat; 7 – Kirleut; 8 – Aktash; 9 – Chokrak; 10 – Tobechik. *R* – correlation coefficient

Известно, что гранулометрический состав осадков сказывается на величине аккумуляции радионуклидов плутония донными отложениями [5, 9]. Поверхностный слой донных отложений с различным гранулометрическим составом характеризуется, как правило, разной степенью обводнённости (влажности). Мелкодисперсным осадкам поверхностного слоя присуща более высокая влажность, чем песчанистым поверхностным донным отложениям. Обводнённость поверхностного слоя осадков солёных озёр Крыма изменялась в широких пределах от (13 ± 1) до (70 ± 3) % (табл. 1), поэтому был проведён поиск взаимосвязи между концентрацией активности радионуклидов плутония и другими физико-химическими параметрами (рис. 5). Значимой корреляции для всех исследованных озёр в целом в отношении редокс-потенциала (R = 0,23) и pH воды (R = -0,16), а также доли органического вещества в донных осадках (R = -0,10) не наблюдали.

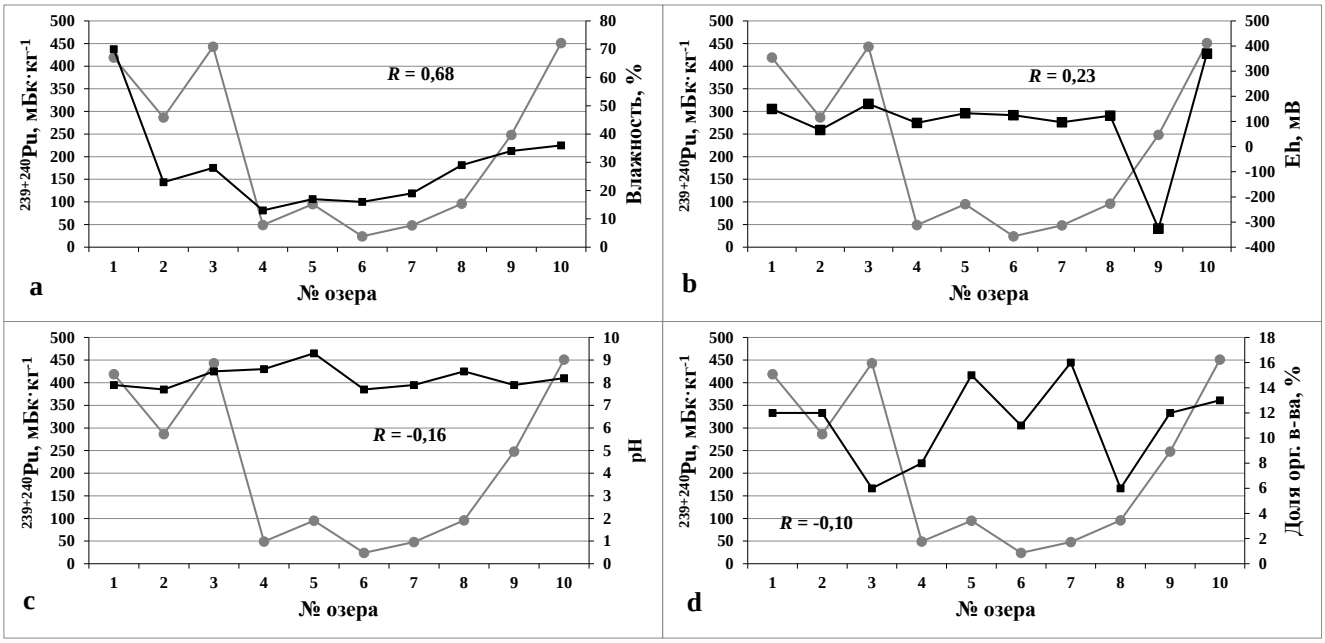

Рис. 5. Изменение концентрации активности изотопов $^{239+240}$Pu (серая линия с круглыми маркерами) при разных значениях влажности донных осадков (a), редокс-потенциала воды Eh (b), pH воды (c) и доли органического вещества (d) в осадке (чёрная линия с квадратными маркерами) в исследуемых озёрах: 1 — Кызыл-Яр; 2 — Сасык-Сиваш; 3 — Джарылгач; 4 — Бакальское; 5 — Красное; 6 — Киятское; 7 — Кирлеутское; 8 — Акташское; 9 — Чокракское; 10 — Тобечикское. *R* — коэффициент корреляции

Fig. 5. Change in the $^{239+240}$Pu activity concentration (gray line with round markers) against different humidity of bottom sediment (a), redox potential of water Eh (b), pH of water (c), and percentage of organic matter (d) in the sediment (black line with square markers) in the salt lakes: 1 – Kyzyl-Yar; 2 – Sasyk-Sivash; 3 – Dzharylhach; 4 – Bakal; 5 – Krasnoye; 6 – Kiyat; 7 – Kirleut; 8 – Aktash; 9 – Chokrak; 10 – Tobechik. *R* – correlation coefficient

Положительная корреляция отмечена между уровнем $^{239+240}$Pu в донных отложениях и влажностью осадка (R = 0,68) (рис. 5). Она подтверждает, что мелкодисперсные поверхностные осадки, имея более высокую влажность, в большей степени накапливают плутоний, чем крупнодисперсные. Как уже отмечалось, в Чёрном море аккумуляционная способность иловых донных отложений на порядок выше, чем таковая песчанистых осадков [12]. Различия значений концентрации активности изотопов плутония в донных отложениях разных солёных озёр Крыма и в осадках прибрежных черноморских акваторий могут быть связаны не только с физико-химическими характеристиками воды и донных отложений, но и с историей поступления $^{239+240}$Pu в изучаемые водные экосистемы, а также с пятнистостью радиоактивных выпадений на территории Крымского полуострова [10].

На уровнях концентрации активности $^{239+240}$Pu в озёрах морского происхождения могло сказываться и дополнительное поступление радионуклидов плутония в Чёрное море с загрязнённых территорий водосборного бассейна моря в разные годы после аварии на ЧАЭС со стоком крупных рек (Днепр, Дунай, Днестр, Южный Буг) [5, 11]. Вариабельность концентрации активности $^{239+240}$Pu в осадках озёр также может быть обусловлена различиями в их связях с другими водосборными системами как природного, так и искусственного происхождения (воды Северо-Крымского канала, поверхностный сток, речной сток и др.).

Оценка дозовых нагрузок от ионизирующего излучения $^{239+240}$Pu показала, что максимальные мощности эквивалентных доз характерны для донных отложений озёр Сасык-Сиваш, Джарылгач и Тобечикское: $1{,}37 \cdot 10^{-4}$; $1{,}67 \cdot 10^{-4}$; $1{,}50 \cdot 10^{-4}$ Зв·год$^{-1}$ соответственно (табл. 2).

В остальных озёрах уровни дозовых нагрузок были ниже. Согласно концептуальной модели зональности хронического действия мощностей доз ионизирующих излучений в природе Г. Г. Поликарпова [5], полученные максимальные значения соответствуют таковым зоны радиационного

Таблица 2. Значения мощности поглощённой дозы ($МД_п$) и мощности эквивалентной дозы ($МД_{экв}$) от ионизирующего излучения $^{239+240}$Pu в 0–5 см слое донных отложений солёных озёр Крыма

Table 2. Commitment dose rates and equivalent dose rates from ionizing radiation of $^{239+240}$Pu in bottom sediments (0–5 cm) of Crimean salt lakes

№	Название озера	$МД_п$, Гр·год$^{-1}$	$МД_{экв}$, Зв·год$^{-1}$
1	Кызыл-Яр	$(3,27 \pm 0,21) \cdot 10^{-6}$	$(6,54 \pm 0,42) \cdot 10^{-5}$
2	Сасык-Сиваш	$(6,86 \pm 0,14) \cdot 10^{-6}$	$(1,37 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
3	Джарылгач	$(8,34 \pm 0,45) \cdot 10^{-6}$	$(1,67 \pm 0,09) \cdot 10^{-4}$
4	Бакальское	$(1,17 \pm 0,14) \cdot 10^{-6}$	$(2,35 \pm 0,29) \cdot 10^{-5}$
5	Красное	$(2,05 \pm 0,26) \cdot 10^{-6}$	$(4,11 \pm 0,52) \cdot 10^{-5}$
6	Киятское	$(3,70 \pm 0,62) \cdot 10^{-7}$	$(7,41 \pm 1,23) \cdot 10^{-6}$
7	Кирлеутское	$(1,02 \pm 0,06) \cdot 10^{-6}$	$(2,03 \pm 0,13) \cdot 10^{-5}$
8	Акташское	$(1,78 \pm 0,18) \cdot 10^{-6}$	$(3,57 \pm 0,37) \cdot 10^{-5}$
9	Чокракское	$(4,26 \pm 0,29) \cdot 10^{-6}$	$(8,52 \pm 0,58) \cdot 10^{-5}$
10	Тобечикское	$(7,49 \pm 0,24) \cdot 10^{-6}$	$(1,50 \pm 0,47) \cdot 10^{-4}$

благополучия, то есть зоны природного радиационного фона, для которого характерен диапазон мощностей доз хронического облучения от $4 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ Зв·год$^{-1}$. Таким образом, вклад дозовых нагрузок от радионуклидов плутония $^{239+240}$Pu не приводит к их увеличению до значений выше природного фона. Современные уровни радионуклидов плутония в поверхностных (0–5 см) донных отложениях не ухудшают ни качество лечебных грязей крымских солёных озёр, ни экологическую ситуацию в них для гидробионтов. Для полной оценки величин дозовых нагрузок необходимо исследование содержания радионуклидов в более глубоких слоях донных отложений, в том числе в тех, которые формировались в периоды максимальных радиоактивных выпадений.

Выводы:

1. Впервые определены уровни концентрации активности $^{239+240}$Pu в поверхностном слое донных отложений десяти солёных озёр Крыма морского и континентального происхождения из четырёх географических групп, а также проведена сравнительная оценка с уровнями концентрации в донных осадках прибрежных акваторий Чёрного моря и Керченского пролива.
2. Полученные уровни $^{239+240}$Pu варьировали в широком диапазоне значений — от 24 до 451 мБк·кг$^{-1}$. Максимальные средние уровни плутония в поверхностном слое (0–5 см) илистых донных отложений обнаружены в Евпаторийской группе озёр — 353 мБк·кг$^{-1}$. Средние уровни $^{239+240}$Pu в осадках озёр Тарханкутской и Керченской групп были ниже на 25–30 % (246 и 265 мБк·кг$^{-1}$ соответственно), в осадках Перекопской группы — на 84 % (56 мБк·кг$^{-1}$).
3. Уровни $^{239+240}$Pu в осадках озёр морского происхождения (озёра Евпаторийской, Тарханкутской и Керченской групп) были в среднем в 5 раз выше таковых в озёрах континентального происхождения (Перекопская группа).
4. Установлено, что в осадках прибрежных черноморских экосистем уровни $^{239+240}$Pu в среднем в 2 раза выше таковых в исследованных солёных озёрах в западной части Крыма.
5. Измерение физико-химических параметров вод в исследуемых озёрах показало их широкую изменчивость, а также наличие положительной корреляционной связи между концентрацией активности $^{239+240}$Pu в осадках и их влажностью ($R = 0,68$).
6. Оценка мощностей доз от ионизирующего излучения $^{239+240}$Pu в донных отложениях озёр показала, что максимальные значения мощности эквивалентной дозы характерны для осадков озёр Сасык-Сиваш, Тобечикское и Джарылгач. Вклад этих дозовых нагрузок от радионуклидов плутония не приводит к росту дозовых нагрузок до значений выше диапазона естественного радиационного фона. Современные уровни радионуклидов плутония в поверхностных (0–5 см) донных отложениях озёр не ухудшают ни качество лечебных грязей, ни экологическую ситуацию в крымских солёных озёрах для гидробионтов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИМБИ по теме «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ гос. регистрации АААА-А18-118020890090-2), а также при поддержке гранта РФФИ «Биогеохимические процессы, определяющие радиохемоэкологическое и экотоксикологическое состояние солёных озёр Крыма и возможности использования их биоресурсов» (проект № 16-05-00134).

Благодарности. Авторы выражают благодарность Короткову А. А., Мосейченко И. Н. и Евтушенко Д. Б. за помощь в отборе проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Дзенс-Литовский А. И., Морачевская О. Г. Соляные водоемы Азово-Черноморского побережья и степного Крыма // *Труды Украинского научно-исследовательского института соляной промышленности*. 1962. Вып. 4, № 12. С. 21–44. [Dzens-Litovskiy A. I., Morachevskaya O. G. Solyanye vodoemy Azovo-Chernomorskogo poberezh'ya i stepnogo Kryma. *Trudy Ukrainskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta solyanoi promyishlennosti*, 1962, iss. 4, no. 12, pp. 21–44. (in Russ.)]
2. Матишов Г. Г., Буфетова М. В., Егоров В. Н. Нормирование потоков поступления тяжелых металлов в Азовское море по оценкам интенсивности седиментационного самоочищения вод // *Наука Юга России*. 2017. Т. 13, № 1. С. 44–58. [Matishov G. G., Bufetova M. V., Egorov V. N. The regulation of flows of heavy metals into the Sea of Azov according to the intensity of sedimentation of water self-purification. *Nauka Yuga Rossii*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 44–58. (in Russ.)]. https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-13-1-44-58
3. Олиферов А. Н., Тимченко З. В. *Реки и озера Крыма*. Симферополь : Доля, 2005. 216 с. [Oliferov A. N., Timchenko Z. V. *Reki i ozera Kryma*. Simferopol: Dolya, 2005, 216 p. (in Russ.)]
4. *Плутоний. Фундаментальные проблемы* : в 2 т. / под ред. Б. А. Надытко, Л. Ф. Тимофеевой ; пер. с англ. Саров : «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2003. Т. 1 – 498 с. ; Т. 2 – 495 с. [*Plutonii. Fundamental'nye problemy* : in 2 vol. / B. A. Nadytko, L. F. Timofeeva (Eds). Sarov: "RFYaTs-VNIIEF", 2003, vol. 1 – 498 p. ; vol. 2 – 495 p. (in Russ.)]
5. Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н., Гулин С. Б., Стокозов Н. А., Лазоренко Г. Е., Мирзоева Н. Ю., Терещенко Н. Н., Цыцугина В. Г., Кулебакина Л. Г., Поповичев В. Н., Коротков А. А., Евтушенко Д. Б., Жерко Н. В., Малахова Л. В. *Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию* / под ред. Г. Г. Поликарпова, В. Н. Егорова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 667 с. [Polikarpov G. G., Egorov V. N., Gulin S. B., Stokozov N. A., Lazorenko G. E., Mirzoyeva N. Yu., Tereshchenko N. N., Tsytsugina V. G., Kulebakina L. G., Popovichev V. N., Korotkov A. A., Yevtushenko D. B., Zherko N. V., Malakhova L. V. *Radioekologicheskii otklik Chernogo morya na chernobyl'skuyu avariyu* / G. G. Polikarpov, V. N. Egorov (Eds). Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2008, 667 p. (in Russ.)]
6. Понизовский А. М. *Соляные ресурсы Крыма.* Киев : Изд-во Крым. 1965. 164 с. [Ponizovskii A. M. *Solyanye resursy Kryma.* Kiev: Izd-vo Krym, 1965, 164 p. (in Russ.)]
7. 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. URL: 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. Saving balneological resources mud of salt lakes of Western Crimea. *Modern scientific researches and innovations*, 2015, no. 7. URL: http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56691 [accessed 2018.07.29]. (in Russ.)]
8. Терещенко Н. Н., Поликарпов Г. Г. Радиоэкологическая ситуация в Черном море в отношении радиоизотопов ^{238,239,240}Pu после Чернобыльской аварии по сравнению с некоторыми другими водоемами вне и в пределах 30-км зоны // *Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин* / под ред. В. И. Мигунова, А. В. Трапезникова. Нижневартовск, 2007. Вып. 10. С. 12–29. [Tereshchenko N. N., Polikarpov G. G. Radioekologicheskaya situatsiya v Chernom more v otnoshenii radioizotopov ^{238,239,240}Pu posle Chernobyl'skoi avarii po sravneniyu s nekotorymi drugimi vodoemami vne i v predelakh 30-km zony. In:

Problemy radioekologii i pogranichnykh distsiplin / V. I. Migunov, A. V. Trapeznikov (Eds). Nizhnevartovsk, 2007, vol. 10, pp. 12–29. (in Russ.)]

9. Трапезников А. В., Молчанова И. В., Караваева Е. Н., Трапезникова В. Н. *Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах*. Екатеринбург : Изд-во Урал. ин-та, 2007. Т. 1. 400 с. [Trapeznikov A. V., Molchanova I. V., Karavaeva E. N., Trapeznikova V. N. *Migratsiya radionuklidov v presnovodnykh i nazemnykh ekosistemakh*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. in-ta, 2007, vol. 1, 400 p. (in Russ.)]
10. *Чернобыльская катастрофа* / под ред. В. Г. Барьяхтара. Киев : Наукова думка, 1995. 473 с. [*Chernobyl'skaya katastrofa* / V. G. Bar'yakhtar (Ed.). Kiev: Naukova dumka, 1995, 473 p. (in Russ.)]
11. Gulin S. B., Mirzoyeva N. Yu., Egorov V. N., Polikarpov G. G., Sidorov I. G., Proskurnin V. Yu. Secondary radioactive contamination of the Black Sea after Chernobyl accident: Recent levels, pathways and trends. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, no. 124, pp. 50–56. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.04.001
12. *Measurement of Radionuclides in Food and the Environment*. Vienna: IAEA, 1989, 182 p. (Technical Report Series ; no. 295).
13. Tereshchenko N. N., Proskurnin V. Yu., Paraskiv A. A., Chuzhikova-Proskurnina O. D. Man-made plutonium radioisotopes in the salt lakes of the Crimean peninsula. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, vol. 36, iss. 6, pp. 1917–1929. https://doi.org/10.1007/s00343-018-7312-5
14. Tereshchenko N. N., Mirzoyeva N. Yu., Gulin S. B., Milchakova N. A. Contemporary radioecological state of the North-western Black Sea and the problems of environment conservation. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, vol. 81, iss. 1, pp. 7–23. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.003
15. 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 Lab., CA (United States), 1994, 19 p.

CONTENT OF PLUTONIUM RADIONUCLIDES IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE SALT LAKES OF THE CRIMEAN PENINSULA IN COMPARISON WITH COASTAL AREAS OF THE BLACK SEA

A. A. Paraskiv, N. N. Tereshchenko, and V. Yu. Proskurnin

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: *artem.paraskiv@mail.ru*

The level of radioactive alpha-emitting radionuclides $^{239+240}$Pu activity concentration assessment in the surface (0–5 cm) bottom sediments from 10 Crimean salt lakes from 4 geographical groups was carried out. The highest values were observed in the lakes from different geographical groups: Kyzyl-Yar – (419 ± 27), Dzharylhach – (443 ± 24), Tobechik – (451 ± 43) mBq·kg^{-1} of $^{239+240}$Pu. The lowest values were observed in 3 studied lakes of Perekop group: Kiyat – (24 ± 6), Kirleut – (48 ± 4), Krasnoye – (95 ± 9) mBq·kg^{-1} of $^{239+240}$Pu. The comparative analysis showed that in the bottom sediment surface layer of the coastal Black Sea areas the $^{239+240}$Pu levels were on average twice as high as those in the surface bottom sediment of the salt lakes of the Crimean peninsula. The dose rates in the surface layer mud from the salt lakes were estimated to be within the natural radioactive background.

Keywords: Crimean salt lakes, bottom sediments, plutonium radionuclides $^{239+240}$Pu, Black Sea