

ИЗУЧЕНИЕ БИОРАЗНООБРАЗИЯ И
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

УДК 574.2:574.632

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЗ, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИРОДНЫМ
РАДИОНУКЛИДОМ ^{210}Po В ГИДРОБИОНТАХ-ФИЛЬТРАТОРАХ ИЗ СОЛЕННЫХ
ОЗЕР КРЫМА И ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНОВ ЧЕРНОГО МОРЯ ***

Коротков А.А.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: a.korotkoff@mail.ru

В работе представлены результаты сравнительной оценки мощностей поглощенных и эквивалентных доз, формируемых у гидробионтов, имеющих сходный тип питания (фильтраторов), от ионизирующего излучения природного радионуклида ^{210}Po . Объектами исследования послужили черноморские двустворчатые моллюски нескольких видов и типичный обитатель соленых озер Крыма жаброногий рачок *Artemia spp.* (Crustacea, Anostraca). Отмечена высокая аккумулирующая способность исследуемых гидробионтов: величины коэффициента накопления ими ^{210}Po варьировал в пределах 10^4 – 10^5 . Определено, что значения поглощенных и эквивалентных доз, полученных этими организмами в результате внутреннего облучения α -частицами ^{210}Po , были близки. Максимальные мощности эквивалентных доз, рассчитанных как для артемий, так и для моллюсков, составили около 10^{-1} Зв·год $^{-1}$. Оценка полученных результатов с использованием шкалы Зон хронического действия ионизирующего излучения, предложенной Г.Г. Поликарповым, показало, что дозы, формируемые ^{210}Po , достигают области «экологической маскировки», что подтверждает значимость ^{210}Po как основного дозообразующего радионуклида.
Ключевые слова: ^{210}Po , дозовые нагрузки, *Artemia spp.*, двустворчатые моллюски, соленые озера, Черное море.

Введение

Известно, что в силу своих физико-химических свойств, ^{210}Po является основным вкладчиком в формирование дозовой нагрузки на гидробионтов: при отсутствии техногенных радиационных аварий его вклад в общую дозу составляет до 60%, а, в отдельных случаях, и более (IAEA, 1995; Aarkrog et al., 1997; IAEA, 2017). ^{210}Po – это наиболее долгоживущий из семи естественных изотопов полония, образующихся в цепи распада трех природных радиоактивных рядов (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th), который замыкает ряд ^{238}U . Период его полураспада составляет 138,4 суток, причем 100 % энергии при распаде ^{210}Po излучает в виде α -частиц с энергией 5,305 МэВ. Ввиду достаточно большого периода полураспада, высокой ионизирующей способности α -частиц, а также благодаря своей способности накапливаться в органах и тканях, связываясь с белками и аминокислотами (Cherry and Shannon, 1974; Aposhian and Bruce, 1991; Durand and Goudard, 2002; Wildgust et al., 2000), ^{210}Po формирует довольно высокие дозы

* Работа выполнена частично по теме государственного задания рег. № НИОКТР АААА-А18-118020890090-2 «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (внутр. № 0828-2018-0006). Работы по определению ^{210}Po в соленых озерах Крыма и артемии проводились при финансовой поддержке Гранта РФФИ № 18-16-00001 «Разработка биологических и геохимических основ развития аквакультуры в гиперсоленых озерах и лагунах Крыма».

внутреннего облучения гидробионтов по сравнению с другими радионуклидами (Cherry and Shannon, 1974; Aarkrog et al., 1997).

Известно, что основным глобальным источником поступления ^{210}Po служат атмосферные выпадения (IAEA, 2017). В атмосфере ^{210}Po образуется в результате распада части радиоактивного ряда ^{238}U : ^{222}Rn – ^{210}Pb – ^{210}Bi – ^{210}Po . На основании оценок глобальных потоков ^{210}Po из атмосферы Земли было показано, что распределение ^{210}Po зависит от географической широты, с выпадениями максимальных активностей в средних широтах (Cherry and Neugaud, 1988). Таким образом, Крымский полуостров, Чёрное и Азовское моря располагаются в регионе, где поступление полония в составе атмосферных выпадений близко к максимальным величинам.

Попадая в водную среду, ^{210}Po быстро включается в процессы биогеохимического переноса, ассоциируясь, в основном, со взвешенным органическим веществом (Wildgust et al., 1998; IAEA, 2017). В прибрежной зоне морей и в небольших водоемах в составе органической взвеси может находиться до 99% полония (Wildgust et al., 2000). Как уже отмечалось выше, полоний активно накапливается гидробионтами. Было установлено, что поглощение ^{210}Po гидробионтами-гетеротрофами происходит только пищевым путем, что позволило говорить о возможном использовании этого радионуклида в качестве природного трассера трофической цепи (Neugaud and Cherry, 1979; Lazorenko and Polikarpov, 2004). Ввиду указанных особенностей поведения полония в водной среде, гидробионты-фильтраторы способны накапливать наибольшие количества этого радионуклида.

На территории Крыма располагается большое количество озер, причем большинство из них – это соленые и гиперсоленые водоемы континентального и морского типа (Балушкина и др., 2009; Balushkina et al., 2005). Наиболее массовым обитателем соленых озер Крыма является жаброногий рачок артемия (*Artemia spp.*, Crustacea, Anostraca). Цисты артемии служат ценным кормовым ресурсом для аквакультуры, а науплиусы этого рачка – самым распространенным живым стартовым кормом для личинок рыб и ракообразных (Леонова и др., 2006). Артемия является типичным фильтратором, питаясь взвешенными в воде микроводорослями, бактериями, мелкими простейшими и детритом (Студеникина, 1999). Поэтому, оценка доз, которые артемия получает от α -излучения инкорпорированного ^{210}Po является актуальной задачей. Нам также представлялось интересным сравнить дозы, получаемые артемией с дозой нагрузкой на других гидробионтов-фильтраторов из сопредельного региона. Объектами для сравнения послужили двустворчатые моллюски, обитающие в прибрежных акваториях Черного моря. Высокий уровень аккумуляции ^{210}Po некоторыми видами черноморских двустворчатых моллюсков и, как следствие, значительные дозовые нагрузки ранее были отмечены в ряде работ (Lazorenko and Polikarpov, 2004; Лазоренко, 2008; Lazorenko and Korotkov, 2017). В связи с этим в задачи работы входило:

- определить концентрацию ^{210}Po в воде изучаемых водоемов;
- определить концентрации природного радионуклида ^{210}Po в цистах и взрослых особях артемии (*Artemia spp.*) из соленых озер Крыма и черноморских моллюсках (*Bivalvia*);
- рассчитать коэффициенты накопления ^{210}Po артемиями и их цистами;
- рассчитать мощности поглощенных и эквивалентных доз, полученных артемиями;
- сравнить полученные результаты с таковыми для массовых видов двустворчатых моллюсков Черного моря;
- оценить степень риска последствий внутреннего облучения взрослых особей *Artemia spp.* и изученных видов двустворчатых моллюсков α -частицами ^{210}Po .

Для соленых озер Крыма, а также некоторых видов черноморских моллюсков такие исследования выполнены впервые.

Материалы и методы

Материал для работы был отобран во время однодневных сухопутных экспедиций на солёные озёра Крыма. Для радиохимического анализа ^{210}Po в период 2016–2018 гг. были отобраны цисты артемии в озерах Джарылгач и Сасык-Сиваш, взрослые особи – из озёр Кирлеутское, Джарылгач и Бакальское. Для сбора артемий и их цист использовали планктонную сеть (150 мкм). Взрослых артемий доставляли в лабораторию в живом виде. При невозможности немедленного проведения радиохимического анализа, пробы, после промывки пресной водой и обсушивания, замораживали и хранили при $t = -15^\circ\text{C}$ не более 10 дней.

Моллюски были отобраны на ряде станций в прибрежной зоне Черного моря, во время 83 и 84 рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2016 г. Отбор производился отрядом бентоса при помощи дночерпателя «Океан-50». Из этих проб отбирали моллюсков, относящихся к наиболее массовым видам, для последующего определения содержания в них ^{210}Po . Материал отбирали в количествах, достаточных для определения этого радионуклида. До прибытия судна в порт пробы сохраняли в замороженном виде при $t = -15^\circ\text{C}$.

Станции отбора проб представлены на рис. 1.

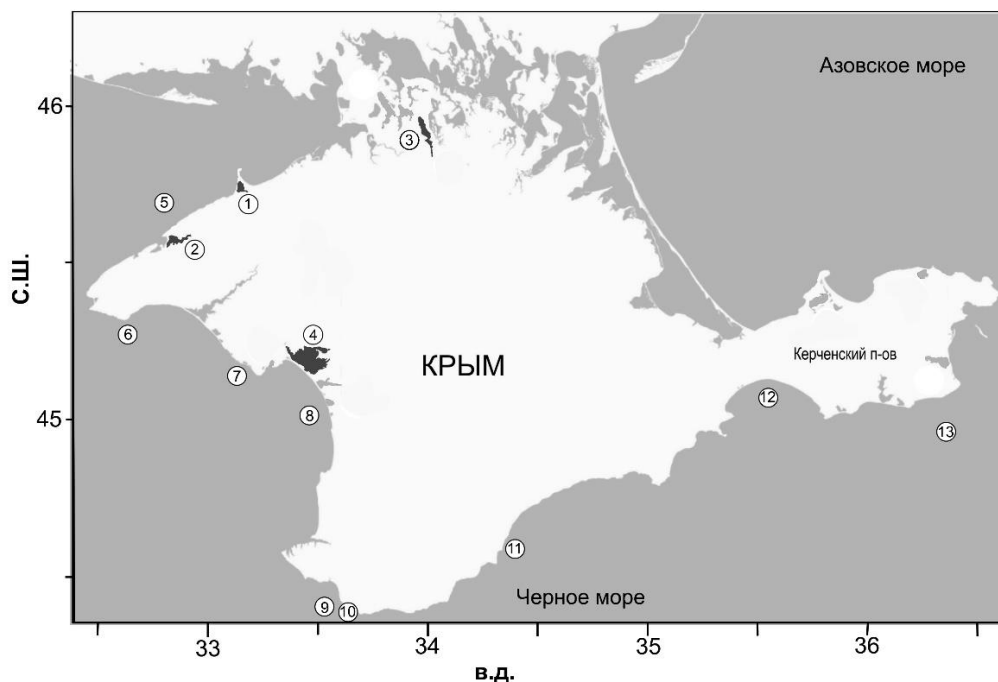


Рис. 1. Схема станций отбора проб: 1 – оз. Бакальское, 2 – оз. Джарылгач, 3 – оз. Кирлеутское, 4 – оз. Сасык-Сиваш, 5 – 13- станции в Черном море (отбор моллюсков)

Отобранный материал доставляли в лабораторию отдела радиационной и химической биологии ФИЦ ИнБЮМ. Для анализа моллюсков брали мягкие ткани, артемий анализировали целиком. Пробы живого материала промывали, удаляли избыток воды с помощью фильтровальной бумаги и взвешивали. Для радиохимического анализа ^{210}Po использовали от 1 до 10 г сырой массы материала. Из проб воды объемом 1–20 л взвешенное вещество удаляли, пропуская пробу через фильтр-картридж (0,5 мкм). Растворенный полоний выделяли из фильтрата, предварительно подкисленного соляной кислотой до $\text{pH} = 2$, соосаждением с Co-APDC (Chen et al., 1998). Осадок отделяли фильтрацией (фильтр Wathman GF-A).

Пробы гидробионтов и фильтры с осадком обрабатывали концентрированными соляной (36% HCl , ос.ч) и азотной (65% HNO_3 , ос.ч) кислотами, перекисью водорода

(30% H₂O₂, ос.ч) при нагревании. Из конечного раствора 0,3 моль·л⁻¹ HCl полоний выделяли путем спонтанного осаждения на серебряный диск. Осаждение проводили в течение 3,5–4 часов при температуре +85°C. По завершении процесса диск промывали дистиллированной водой, высушивали при комнатной температуре и использовали в качестве счетного образца для α -спектрометрии (Chen et al., 1998). Химический выход ²¹⁰Po определяли добавлением в исследуемую пробу трассера – ²⁰⁸Po, с периодом полураспада 2,898 года и энергией α -частиц 5,114 МэВ. Для измеренных образцов он был не ниже 85%.

Спектрометрические измерения образцов были проведены на базе отдела континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН (биофизическая станция, г. Заречный Свердловской обл.). Использовался альфа-спектрометрический комплекс на базе OSTEË Plus с программным обеспечением MAESTRO MCA и Alpha Vision (ORTEC – АМЕТЕК, США). Концентрации ²¹⁰Po в пробах рассчитывали по методике (Radiochemistry Procedures Manual..., 1984), результаты выражали в Бк·кг⁻¹ сырой массы для гидробионтов, мБк·л⁻¹ – для воды. Статистическую ошибку альфа-спектрометрических измерений рассчитывали по величине одного стандартного отклонения (1 σ) от средних значений. Ошибка не превышала 15%. Статистический анализ результатов проводили с использованием общепринятых методов (Mayer, 1999).

Для оценки и сравнительного анализа способности гидробионтов аккумулировать ²¹⁰Po рассчитывали коэффициенты накопления (К.Н.) этого радионуклида гидробионтами (IAEA, 2017):

$$\text{К.Н.} = \frac{\text{Концентрация } ^{210}\text{Po} \text{ аккумулированная гидробионтом, Бк}\cdot\text{кг}^{-1}}{\text{Концентрация } ^{210}\text{Po} \text{ в воде (растворенная форма), Бк}\cdot\text{л}^{-1}} \quad (1)$$

Для расчета мощностей поглощенных доз, формируемых излучением α -частиц ²¹⁰Po в гидробионтах были использованы подходы и критерии, изложенные в работах (Thomas and Liber, 2001; Kryshev et al., 2002), а также формула (2), предложенная в работе (Blaylock et al., 1993):

$$D = 5.04 \times 10^{-6} \times C_{\text{орг}} \times E \quad (2)$$

где: D – поглощенная доза, полученная в течение года организмом от аккумулированного в нем альфа-излучающего радионуклида, Гр·год⁻¹; $C_{\text{орг}}$ – концентрация этого радионуклида в гидробионте, Бк·кг⁻¹ сырой массы; E – энергия исследуемого радионуклида, МэВ.

Действие альфа-излучающих радионуклидов в морской среде оценивается только по их доле, инкорпорированной гидробионтами, т.к. вклад внешнего облучения от воды и донных отложений исключается в силу физических характеристик α -частиц (Thomas and Liber, 2001). Для расчета эквивалентных доз облучения артемии использовали взвешивающий коэффициент равный 20 для α -частиц (ICRP, 2017).

Полученные результаты сравнивали со шкалой Зон хронического действия ионизирующего излучения, предложенной Г.Г. Поликарповым (Polikarpov, 1998; Поликарпов, 2008).

Результаты и обсуждение

Концентрации ²¹⁰Po, определенные в цистах и взрослых артемиях, отобранных в соленых озерах Крыма представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Концентрации ^{210}Po , определенные для цист и взрослых артемий (*Artemia spp.*)

Объект	Место отбора	Год	^{210}Po , Бк·кг ⁻¹ сырой массы ± 1σ	
			минимум	максимум
Цисты	оз. Джарылгач	2016–2017	4,1±0,7	8,5±1,5
Взрослые особи	оз. Джарылгач	2016–2018	36,9±1,8	198,3±7,9
	оз. Бакальское	2018	170,2±8,1	200,4±10,5
	оз. Кирлеутское	2017	-	25,3±3,6
Цисты	оз. Сасык-Сиваш	2016	-	3,6±0,8

Результаты определения этого радионуклида в телах двустворчатых моллюсков, относящихся к нескольким массовым черноморским видам, отобранных в прибрежной зоне, представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Концентрации ^{210}Po в моллюсках

Объект	Место отбора	^{210}Po , Бк·кг ⁻¹ сырой массы ± 1σ	
		минимум	максимум
<i>Gibbomodiola adriatica</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	91,2±7,7	253,7±9,0
<i>Mytilus galloprovincialis</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	24,8±1,7	260,4±10,2
<i>Pitar rudis</i> (Poli, 1795)	Черное море	20,0±1,2	47,3±1,5
<i>Modiolula phaseolina</i> (Philippi, 1844)	Черное море	36,5±1,2	43,9±1,7
<i>Gouldia minima</i> (Montagu, 1803)	Черное море	-	53,7±3,1
<i>Cerastoderma edule</i> (Linnaeus, 1758)	оз. Бакальское	-	120,9±9,6

На основании полученных данных для оценки аккумулирующей способности исследуемых гидробионтов в отношении ^{210}Po были рассчитаны величины коэффициентов накопления ^{210}Po этими гидробионтами. Для этих расчетов были также определены концентрации растворенного ^{210}Po в воде из мест обитания исследованных животных. Относительно высокие концентрации отмечены в воде озер Кирлеутское и Сасык-Сиваш: 5,8±0,1 и 5,0±0,2 мБк·л⁻¹, соответственно. В воде озер Джарылгач и Бакальское удельная активность ^{210}Po была приблизительно вдвое ниже: 2,7±0,1 и 2,3±0,1 мБк·л⁻¹, соответственно. В воде прибрежных районов Черного моря, где были отобраны моллюски, концентрация ^{210}Po составляла 0,5–0,7 мБк·л⁻¹.

Максимальные величины коэффициентов накопления, которые были рассчитаны для отобранных гидробионтов, приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Коэффициенты накопления (К.Н.) ^{210}Po , рассчитанные для исследованных гидробионтов

Объект	Место отбора	К.Н. (макс.)
<i>Artemia spp.</i> , взрослые особи	оз. Джарылгач	7,3·10 ⁴
<i>Artemia spp.</i> , взрослые особи	оз. Бакальское	8,7·10 ⁴
<i>Artemia spp.</i> , взрослые особи	оз. Кирлеутское	4,4·10 ³
<i>Artemia spp.</i> (цисты)	оз. Джарылгач	3,1·10 ³
<i>Artemia spp.</i> (цисты)	оз. Сасык-Сиваш	6,4·10 ²
<i>Gibbomodiola adriatica</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	3,7·10 ⁵
<i>Mytilus galloprovincialis</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	4,3·10 ⁵
<i>Pitar rudis</i> (Poli, 1795)	Черное море	6,7·10 ⁴
<i>Modiolula phaseolina</i> (Philippi, 1844)	Черное море	6,3·10 ⁴
<i>Gouldia minima</i> (Montagu, 1803)	Черное море	7,7·10 ⁴
<i>Cerastoderma edule</i> (Linnaeus, 1758)	оз. Бакальское	5,3·10 ⁴

Как известно, содержание ^{210}Po в телах двустворчатых моллюсков в значительной степени зависит от стадии развития их гонад (Лазоренко, 2008; Lazorenko et al., 2010).

Наиболее высокие концентрации ^{210}Po в них обнаруживаются в преднерестовый период, а минимальные – в период нереста и сразу после него, поскольку значительная часть полония выбрасывается в воду вместе с половыми продуктами. Исследованные нами виды черноморских моллюсков были отобраны в апреле, т.е. до наступления периода нереста (Киселева, 1981). Поэтому можно предположить, что содержание ^{210}Po в их гонадах (и, соответственно, телах) было близко к максимальным величинам.

Наиболее высокой аккумулярующей способностью в отношении ^{210}Po отличались два вида черноморских моллюсков *Gibbomodiola adriatica* и *Mytilus galloprovincialis*. Максимальные значения К.Н. для этих видов были близки и составляли $3,7 \cdot 10^5$ и $4,3 \cdot 10^5$, соответственно, что почти в 5 раз превышало этот показатель для артемии, отобранной в Джарылгаче ($8,7 \cdot 10^4$). Для других гидробионтов-фильтраторов К.Н. были еще ниже. При этом величина К.Н. ^{210}Po , полученная для *Artemia spp.* из оз. Бакальского была несколько выше, чем для отобранного в нем же двустворчатого моллюска *C. edule* ($8,7 \cdot 10^4$ против $5,3 \cdot 10^4$, соответственно). Как и ожидалось, наименьшие значения К.Н. ^{210}Po показали цисты артемии, что, очевидно, объясняется пищевым путем поступления этого радионуклида в организм гидробионтов. Небольшие количества этого радионуклида, которые были определены, по-видимому, остались после промывки на внешней поверхности цист.

При сравнении коэффициентов накопления ^{210}Po было отмечено, что относительно низкие значения К.Н. получены для обитателей водоемов с большей соленостью воды и наоборот. Так, К.Н. ^{210}Po артемией из оз. Кирлеутского (соленость воды 318‰) составил $4,4 \cdot 10^3$, Джарылгача (188‰) – $7,3 \cdot 10^4$, Бакальского (ок. 47‰) – $8,7 \cdot 10^4$. Максимальные К.Н. ^{210}Po моллюсками Черного моря (соленость воды 16–18‰), как уже было показано выше, превышали 10^5 . В литературе имеются сведения о том, что при повышении солености воды наблюдается увеличение концентрации полония в растворенной фазе (Neugaud and Cherry, 1979). Однако, для однозначного утверждения, что эта тенденция имеет место в этом случае данных недостаточно. В целом можно констатировать, что исследованные организмы-фильтраторы отличаются высокой способностью аккумуляровать природный радионуклид ^{210}Po .

Для сравнительной оценки дозовых нагрузок на гидробионтов-фильтраторов, были рассчитаны мощности доз, которые они получают от внутреннего облучения α -частицами ^{210}Po . Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4.

Мощности доз, рассчитанные для исследованных гидробионтов

Объект	Место отбора	Мощность дозы (мин. - макс.)	
		Поглощенной, Гр·год ⁻¹	Эквивалентной, Зв·год ⁻¹
<i>Gibbomodiola adriatica</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	$2,5 \cdot 10^{-3} - 7,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-2} - 1,4 \cdot 10^{-1}$
<i>Mytilus galloprovincialis</i> (Lamarck, 1819)	Черное море	$6,7 \cdot 10^{-4} - 7,0 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2} - 1,4 \cdot 10^{-1}$
<i>Pitar rudis</i> (Poli, 1795)	Черное море	$5,5 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2} - 2,5 \cdot 10^{-2}$
<i>Modiolula phaseolina</i> (Philippi, 1844)	Черное море	$1,0 \cdot 10^{-3} - 1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2} - 2,4 \cdot 10^{-2}$
<i>Gouldia minima</i> (Montagu, 1803)	Черное море	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$
<i>Cerastoderma edule</i> (Linnaeus, 1758)	оз. Бакальское	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$
<i>Artemia spp.</i> (взрослые)	оз. Джарылгач	$1,0 \cdot 10^{-3} - 5,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2} - 1,1 \cdot 10^{-1}$
<i>Artemia spp.</i> (взрослые)	оз. Бакальское	$4,7 \cdot 10^{-3} - 5,5 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-2} - 1,1 \cdot 10^{-1}$
<i>Artemia spp.</i> (взрослые)	оз. Кирлеутское	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
<i>Artemia spp.</i> (цисты)	оз. Джарылгач	$1,1 \cdot 10^{-4} - 2,3 \cdot 10^{-4}$	-
<i>Artemia spp.</i> (цисты)	оз. Сасык-Сиваш	$9,6 \cdot 10^{-5}$	-

Эквивалентные дозы для цист артемии не рассчитывали ввиду невозможности инкорпорирования ими полония и, следовательно, отсутствия внутреннего облучения α -частицами, которые образуются при его распаде.

Было установлено, что мощности доз, полученные исследованными организмами, варьировали в пределах одного порядка величин: 10^{-2} – 10^{-1} Зв·год $^{-1}$. При этом максимальные эквивалентные дозы, рассчитанные как для взрослых особей *Artemia spp.*, отобранных в оз. Бакальское и Джарылгач, так и для представителей двух видов двустворчатых моллюсков Черного моря (*G. adriatica* и *M. galloprovincialis*) были практически одинаковыми: $1,1 \cdot 10^{-1}$ и $1,4 \cdot 10^{-1}$ Зв·год $^{-1}$, соответственно. При сравнении полученных результатов с литературными данными было отмечено, что дозы, рассчитанные Г.Е. Лазоренко для черноморских моллюсков, находились в пределах величин, полученных в данной работе, хотя максимальные значения были несколько ниже и составляли для мидии (*M. galloprovincialis*) $3,3 \cdot 10^{-2}$ Зв·год $^{-1}$ (Лазоренко, 2008).

Значительно меньшие мощности доз этот моллюск получает от радиоактивного излучения таких опасных техногенных радионуклидов, как ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$. Из представленных данных видно, что суммарная поглощенная доза, формируемая у *M. galloprovincialis* ^{137}Cs и ^{90}Sr составляла $1,8 \cdot 10^{-5}$ Гр·год $^{-1}$ (Egorov et al., 2006), а эквивалентная доза внутреннего облучения α -частицами $^{239,240}\text{Pu}$ – $1,24 \cdot 10^{-6}$ Зв·год $^{-1}$ (Терещенко и Поликарпов, 2008).

Что касается артемии, то суммарные поглощенные дозы, полученные взрослыми особями артемии от ионизирующего излучения искусственного ^{137}Cs и природных ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{234}Th , ^{238}U , ^{40}K , составляли $1,3 \cdot 10^{-5}$ Гр·год $^{-1}$ (Мирзоева и др., 2019), т.е. были почти на два порядка ниже, чем минимальная величина поглощенной дозы от ^{210}Po , рассчитанная нами для этого организма: $7,0 \cdot 10^{-4}$ Гр·год $^{-1}$ (табл. 4). Таким образом, вклад ^{210}Po даже в этом случае составляет более 98% от общей дозы, поглощенной *Artemia spp.*

Для того, чтобы оценить последствия внутреннего облучения взрослых особей *Artemia spp.* и двустворчатых моллюсков α -частицами ^{210}Po , рассчитанные мощности эквивалентных доз сравнивали со шкалой «Зон мощностей доз и их действия в Биосфере» Г.Г. Поликарпова (Polikarpov, 1998; Поликарпов, 2008). Результат представлен на рис. 2.

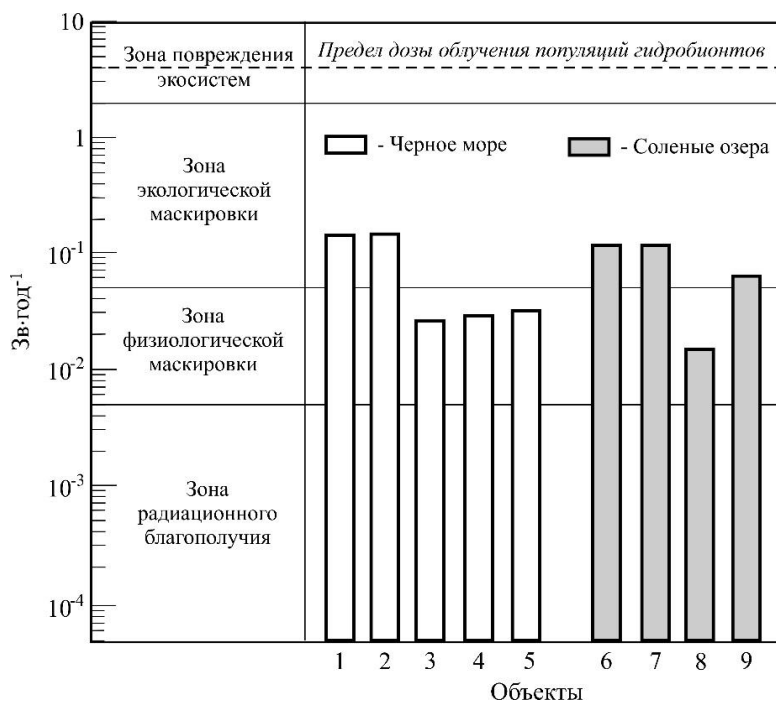


Рис. 2. Сравнение максимальных дозовых нагрузок на моллюсков-фильтраторов (1 – *G. adriatica*, 2 – *M. galloprovincialis*, 3 – *M. phaseolina*, 4 – *P. rudis*, 5 – *G. minima*, 9 – *C. edule*, оз. Бакальское) и взрослых артемий (*Artemia spp.*) из соленых озер Крыма (6 – оз. Джарылгач, 7 – оз. Бакальское, 8 – оз. Кирлеутское), формируемых природным радионуклидом ^{210}Po .

Такое сравнение рассчитанных доз со шкалой «Зон мощностей доз...» является одним из методов, который дает возможность оценить уровень последствий воздействия излучения искусственных и природных радионуклидов для гидробионтов.

В результате было определено, что дозы, полученные изученными организмами от внутреннего облучения, формируемого ^{210}Po , располагаются в двух Зонах: «физиологической маскировки» и «экологической маскировки» (рис. 2). В пределах первой радиационные эффекты во многих случаях могут маскироваться природной вариабельностью различных физиологических функций и содержанием биохимических компонентов. Уровень облучения в пределах этой Зоны достаточен для продуцирования регистрируемых эффектов (Polikarpov, 1998; Поликарпов и др., 2008).

Определенные нами дозы, полученные артемиями и моллюсками от ионизирующего излучения ^{210}Po , находились в пределах «Зоны экологической маскировки». Серьезный маскирующий эффект в этой Зоне может обеспечиваться различным состоянием популяций, сезонными изменениями и вариабельностью экологических условий, а также результатом действий естественного отбора (Polikarpov, 1998; Поликарпов и др., 2008). При этом, рассчитанные величины эквивалентных доз были значительно ниже предела дозы облучения, предложенного МАГАТЭ для популяций гидробионтов (IAEA, 2017). В целом, можно отметить, что гидробионты, имеющие сходный тип питания (фильтраторы), несмотря на различную таксономическую принадлежность, различие мест и условий обитания, могут получать практически одинаковые дозы от α -излучения инкорпорированного ^{210}Po , поступающего пищевым путем.

Выводы

В ходе исследования была выполнена сравнительная оценка дозовых нагрузок, формируемых природным радионуклидом ^{210}Po на гидробионтов-фильтраторов, имеющих сходство только по способу питания, а именно: типичного обитателя соленых озер Крыма жаброногого рачка *Artemia spp.* и двустворчатых моллюсков из прибрежной зоны Черного моря, относящихся к нескольким, массовым видам. В отношении обитателей соленых озер и ряда видов моллюсков такие исследования проведены впервые.

Установлено, что все исследованные гидробионты, за исключением цист артемии, отличались высокой аккумулярующей способностью в отношении ^{210}Po . Низкие значения коэффициента накопления ^{210}Po для цист *Artemia spp.* указывает на то, что поступление этого радионуклида в организм исследованных гидробионтов происходит пищевым путем.

Проведенный расчет показал, что мощности эквивалентных доз, формируемых внутренним облучением гидробионтов-фильтраторов α -частицами ^{210}Po достигают высоких значений: более 10^{-1} Зв·год $^{-1}$. Определено, что максимальные величины дозовых нагрузок для двух видов черноморских моллюсков и артемий были практически одинаковыми.

Показана высокая радиологическая значимость ^{210}Po для изученных гидробионтов как основного дозообразующего радионуклида.

При сопоставлении рассчитанных доз со шкалой «Зон мощностей доз и их действия в Биосфере» Г.Г. Поликарпова, установлено, что максимальные величины эквивалентных доз достигают «Зоны экологической маскировки» как для артемии, так и для моллюсков двух видов. Мощности эквивалентных доз были значительно ниже предела дозы облучения, рекомендованного МАГАТЭ для популяций гидробионтов.

Метод сопоставления рассчитанных доз со шкалой «Зон мощностей доз и их действия в Биосфере», предложенный академиком Г.Г. Поликарповым может быть использован для контроля радиэкологического состояния водных экосистем.

Благодарности

Автор выражает благодарность с.н.с., к.б.н Н.К. Ревкову за отбор и определение моллюсков, а также вед. инж. И.Н. Мосейченко и вед. инж. Д.Б. Евтушенко за помощь при отборе материала во время экспедиций на соленые озера.

Список литературы

1. Балущкина Е.В., Голубков С.М., Голубков М.С. и др. Влияние абиотических и биотических факторов на структурно-функциональную организацию экосистем солёных озёр Крыма // Журн. общ. биологии. 2009. Т. 70, № 6. С. 504–514.
2. Киселева М.И. Бентос рыхлых грунтов Черного моря. – Киев: Наукова думка, 1981. 165 с.
3. Лазоренко Г.Е. Распределение природного радионуклида ^{210}Po в компонентах экосистемы Черного моря // Радиоэкологический отклик Черного моря на Чернобыльскую аварию / Под ред.: Г.Г. Поликарпова и В.Н. Егорова. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. С. 311–337.
4. Лазоренко Г.Е. Поликарпов Г.Г. Полоний-210 в рыбах Черного моря // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т. 50, № 4. С. 398–404.
5. Леонова Г.А., Богущ А.А., Бобров В.А. Биоиндикация оценка состояния соляных озер Кулунды (Алтайский, край) по биогеохимическим критериям // Съезд Гидробиологического общества РАН (г. Тольятти, Россия, 18-22 сентября 2006 г.). 2006. Т. 1. С. 44–46.
6. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды / ред.: А.Н. Марей, А.С. Зыкова. – М.: МЗ СССР, 1980. 356 с.
7. Мирзоева Н.Ю., Коротков А.А., Лазоренко Г.Е. Современные дозовые нагрузки от излучений техногенного ^{137}Cs и природных радионуклидов на жаброного рачка *Artemia spp.* из соленых озер Крыма // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59, № 4. С. 419–429.
8. 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 Чёрного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г.Г. Поликарпова и В.Н. Егорова. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. С. 351–358.
9. Студеникина Т.Л. Особенности биологии рачка *Artemia salina* в условиях соленых озер // Водоёмы Алтайского края. – Новосибирск, 1999. С. 112–122.
10. Терещенко Н.Н., Поликарпов Г.Г. Современные дозовые нагрузки для черноморских гидробионтов от $^{239,240}\text{Pu}$ после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиоэкологический отклик Черного моря на Чернобыльскую аварию / Под ред.: Г.Г. Поликарпова и В.Н. Егорова. – Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. С. 371 – 376.
11. Aarkrog A., Baxter M.S., Battercourt A.O., Bojanowski R., Bologna A., Charmasson S., Cunha I., Delfanti R., Duran E., Holm E., Jeffree R., Livingston H.D., Mahapanayawong S., Nies H., Osvath I., Pingyi Li., Povinec P.P., Sanchez A., Smith J.N., Swift D. A comparison of doses from ^{137}Cs and ^{210}Po in marine food: A major international study // Journal of Environmental Radioactivity. 1997. Vol. 34. N 1. P. 69–90.
12. Aposhian H.V., Bruce D.C. Binding of polonium-210 to liver metallothionein // Rad. Res. 1991. Vol. 126. P. 379–382.
13. Balushkina E.V., Golubkov S.M., Golubkov M.S. et al. Characteristic features of ecosystems of hyperhaline lakes of the Crimea // Proc. Zoological Institute of Russian Academy of Sciences. 2005. Vol. 308. P. 5–13.

14. Baxter M.S. Technologically enhanced radioactivity: an overview // Journal of Environmental Radioactivity. 1996. Vol. 32.N 1–2. P. 3–17.
15. Blaylock B.G., Frank M.I., O'Neal B.R. Methodology for estimating radiation dose rates to freshwater biota exposed to radionuclides in the environment // Report ES/ER/TM–78: Prepared for the U.S. DOE, Contract DE-AC05-84OR21400. Oak Ridge, TN, USA: Oak Ridge National Laboratory. 1993. 40 p.
16. Chen Q., Dahlggaard H., Nielsen S.P., Aarkrog A. Determination of ^{210}Po and ^{210}Pb in mussel, fish, sediment, petroleum // RISØ National Laboratory (Roskilde, Denmark). Nov. 1998. 10p.
17. Cherry R.D., Heyraud M. Lead-210 and polonium-210 in the World's oceans. // IAEA-TECDOC-481: Inventories of selected radionuclides in the oceans. Vienna: IAEA. 1988.P. 139–158.
18. Cherry R.D., Shannon L.V. The alpha radioactivity of marine organisms // Atomic Energy Review. 1974. Vol. 12. P. 3–45.
19. Durand J.P., Goudard F. Ferritin and hemocyanin: ^{210}Po molecular traps in marine fish, oyster and lobster // Marine Ecology Progress Series. 2002. Vol. 233. Is. 4. P. 199–205.
20. Egorov V.N., Lazorenko G.E., Mirzoeva N.Yu., Stokozov N.A., Kostova S.K., Malakhova L.V., Pirkova A.V., Arkhipova S.N., Korkishko N.F., Popovichev V.N., Plotitsyna O.V., Migal L.V. Content ^{137}Cs , ^{40}K , ^{90}Sr , ^{210}Po radionuclides and some chemical pollutants in the Black Sea mussels *Mytilus galloprovincialis* // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5. № 3. С. 70–78.
21. EPA (Environmental Protection Agency, USA) Radiochemistry Procedures Manual // Eastern Environmental Radiation Facility. EPA 520/5–96–006. P.00.03.01–03. 1984. 342 p.
22. Friedrich J., Rutgers van der Loeff M.M. A two tracer (^{210}Po - ^{234}Th) approach to distinguish organic carbon and biogenic silica export flux in the Antarctic Circumpolar Current // Deep Sea Research. 2002. Part I. Vol. 49.P. 339–354.
23. Heyraud M., Cherry R.D. Polonium-210 and lead-210 in marine food chains // Marine Biology. 1979. Vol. 52.N3. P. 227–236.
24. ICRP. Dose coefficients for nonhuman biota environmentally exposed to radiation // ICRP Publication 136. Ann. ICRP 46(2). 2017. 92 p.
25. Kryshev I., Sazykina T., Kryshev A. et al. Ecological dosimetry models // Radionuclides uptake and transfer in pelagic food chains of the Barents Sea and resulting doses to man and biota. Project of NRPA, IMR, AUN, IET (Norway) and SPA TYPHOON (Russia). Norway: NRPA, 2002. 97 p.
26. Lazorenko G.E., Polikarpov G.G. ^{210}Po in marine biota // Regional Technical Co-operation Project RER/2/003 "Marine Environmental Assessment of the Black Sea": Working Material. Reproduced by the IAEA. Vienna: IAEA, 2004.P. 168–173.
27. Lazorenko G.E., Polikarpov G.G., Osvath I. ^{210}Po accumulation by components of the Black Sea ecosystem // Radioprotection. 2009. Vol. 44. N5. P. 981–986.
28. Lazorenko G.E., Polikarpov G.G., Pirkova A.V., Osvath I. Naturally occurring radionuclide Po-210 in the Black Sea molluscs // Морской экологический журнал. 2010. Т. 9, №3. С. 43–48.
29. Mayer K. Basics and essentials of statistics. // IAEA Regional advanced training course on quality management in environmental applications of nuclear analytical techniques (Karlsruhe (Germany), (23 Aug.–3 Sept. 1999) European Commission, Joint Research Centre, Institute for Transuranium Elements. Karlsruhe: Center for Advanced Technological and Environmental Training (FTU), 1999. 320 p.
30. Polikarpov G.G. Conceptual model of responses of organisms, populations and ecosystems to all possible dose rates of ionizing radiation in the environment // Radiat. Prot. Dosim. 1998. Vol. 75. N 1–4. P. 181–185.

31. Radiation protection and the management radiation protection of radioactive waste in the oil and gas industry // IAEA Safety Reports Series, no. 34, Vienna: IAEA, 2003. 139 p.
32. Rutgers van der Loeff M.M., Geiber W. U- and Th-series nuclides as tracers of particle dynamics, scavenging and biogeochemical cycles in the oceans. U-Th series nuclides in aquatic systems/ S. Krishnaswami, J.K. Cochran (Eds.).Chapter 7, Amsterdam: Elsevier, 2008. P. 227–268.
33. Sources of radioactivity in the marine environment and their relative contributions to overall dose assessment from marine radioactivity (MARDOS) // Technical Document 838. Vienna: IAEA, 1995.
34. The environmental behaviour of polonium // Technical Report Series, no. 484. Vienna: IAEA, 2017. 255 p.
35. Thomas P., Liber K. An estimation of radiation doses to benthic invertebrates from sediments collected near a Canadian uranium mine // J. Environ. International. 2001. Vol. 27. P. 341–353.
36. Wildgust M.A., McDonald P., White K.N. Temporal changes of ^{210}Po in temporal coastal waters // The Science of Total Environment. 1998. Vol. 214. Iss. 1/4. P. 1–10.
37. Wildgust M.A., McDonald P., White K.N. Assimilation of ^{210}Po by mussel *Mytilus edulis* from the alga *Isochrysis galbana* // Marine Biology. 2000. Vol. 136. P. 49–53.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF DOSES FORMED BY NATURALLY OCCURRING RADIONUCLIDE ^{210}Po IN FILTER-FEEDING HYDROBIONTS FROM SALT LAKES OF THE CRIMEA AND COASTAL AREAS OF THE BLACK SEA

Korotkov A.A.

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: a.korotkoff@mail.ru

This paper presents the results of the comparative assessment of absorbed and equivalent dose rates generated by naturally occurring radionuclide ^{210}Po in hydrobionts with a similar feeding type (filter-feeding organisms). The objects were some species of the bivalve mollusks from Black Sea and the typical inhabitant of the salt lakes of the Crimea, the gill-legged crustacean *Artemia spp.* High ability of the studied hydrobionts to accumulate polonium was noted. The values of the ^{210}Po concentration ratio ranged from 10^4 to 10^5 . Comparison of equivalent doses received by these organisms (as result of internal irradiation with α -particles produced by ^{210}Po) showed that values of the dose rates were quite close. The maximum equivalent dose rates calculated for both artemias and molluscs were about $10^{-1} \text{ Sv}\cdot\text{year}^{-1}$. Evaluation of obtained results using proposed by G. G. Polikarpov “Scale of chronic irradiation zones” showed that the doses formed by ^{210}Po reach the “ecological masking” zone, which confirms the radiological importance of ^{210}Po as the main contributor to the total dose.

Keywords: ^{210}Po ; dose; *Artemia spp.*; bivalve mollusks; salt lakes; the Black Sea.

Коротков Андрей Анатольевич Младший научный сотрудник радиационной и химической биологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», e-mail: a.korotkoff@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2020 г.