

^{210}Po В ЭКОСИСТЕМЕ ЧЁРНОГО МОРЯ: ПОСТУПЛЕНИЕ, МИГРАЦИЯ И АККУМУЛИРОВАНИЕ ГИДРОБИОНТАМИ

Г. Е. Лазоренко

Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, РФ,
g.e.lazorenko@gmail.com

Представлены результаты исследования ^{210}Po в экосистеме Чёрного моря. Показано, что пространственное распределение этого природного радионуклида в воде определяется количеством взвешенного органического вещества, а в донных отложениях – биоседиментационными процессами. Уровни аккумуляции ^{210}Po гидробионтами увеличивается в ряду: макрофиты, зоопланктон, рыбы и моллюски.

Ключевые слова: ^{210}Po , экосистема, Чёрное море, миграция, аккумуляция, гидробионты

Внимание к изучению поведения природного радионуклида ^{210}Po в морских экосистемах вызвано, прежде всего, его вкладом в формирование в гидробионтах дозовых нагрузок, превышающих суммарный вклад всех других представителей природной радиоактивности [1]. В условиях неаварийных ситуаций на атомных станциях отношение доз облучения морской биоты и человека, вследствие употребления в пищу морепродуктов, от ^{210}Po и техногенного ^{137}Cs достигает 10^2 – 10^3 раз [2]. ^{210}Po – последний радионуклид в естественном радиоактивном ряду ^{238}U , является 100%-ным альфа-излучателем с энергией частиц 5,305 МэВ и периодом их полураспада 138,4 сут. На поверхность морей и океанов ^{210}Po попадает, в основном, с атмосферными осадками и аэрозолями и тотчас включается в биогеохимические процессы на границе воздух – водная среда, связываясь взвешенным органическим веществом [1, 3, 4]. ^{210}Po является одним из основных трассеров биогеохимических процессов в морях и океанах [5, 6]. Дополнительными источниками поступления ^{210}Po , как и других природных радионуклидов, в морскую среду являются жидкие отходы производств, связанных с добычей и переработкой руд, содержащих уран, торий, редкоземельные элементы и фосфорные соединения [7]. Попадая в морские организмы только с пищей, этот радионуклид включается в структуру их аминокислот и белков [1]. Высказано мнение, что «с точки зрения морской биологии, ^{210}Po служит природным трассером пищевых взаимоотношений» [4]. Изучение поведения этого радионуклида в компонентах экосистемы Чёрного моря начато нами в 1998 г. в рамках Международного проекта МАГАТЭ RER/2/003 «Оценка состояния морской среды Чёрного моря» (1996–2001 гг.) при его материально-технической поддержке. В настоящей работе представлены обобщающие результаты собственных многолетних исследований ^{210}Po в черноморской экосистеме.

Материал и методы. Объектами исследования в Чёрном море были поверхностная вода, донные отложения, 6 видов макрофитов (цистоцира косматая *Cystoseira crinita* (Desf.) Borg, ульва *Ulva rigida* C. Agardh, энтероморфа *Enteromorpha intestinalis* (L.) Nees, лауренсия *Laurencia obtusa* (Huds.) Lamour, филлофора (*Coccolytus truncatus* (Pallas) M.J.Wynne & J.N.Heine, 1992 и *Phyllophora crispa* (Hudson) P.S.Dixon, 1964), 5 видов моллюсков (мидия *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, гигантская устрица *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793), черноморская устрица *Ostrea edulis* (Linné, 1758), анадара *Anadara inaequalis* (Bruguère, 1789), нана *Nana nerithea* (Linné, 1758)) и 20 видов рыб из разных экологических групп. Радиохимический анализ ^{210}Po в пробах

проводили в соответствии с методическими рекомендациями [8] и разработками [9]. Химический выход оценивали, используя искусственный изотоп ^{208}Po (AEA Technology, Великобритания) с энергией излучения альфа-частиц 5,114 МэВ и периодом полураспада 2,898 г. Спонтанное осаждение обоих изотопов (^{208}Po и ^{210}Po) на диски из серебряной фольги осуществлялось в термостате при температуре 85 °С в течение 3,5 ч., а их измерение – на альфа-спектрометре ОСТЕТЕ РС фирмы EG&G ORTEC (США). Величина химического выхода составляла 70% для проб воды, 85–95% – для гидробионтов и донных отложений. Концентрации ^{210}Po в пробах после из измерения рассчитывали и выражали в Бк·кг⁻¹ сырой массы для гидробионтов, Бк·кг⁻¹ сухой массы для донных отложений и мБк·дм⁻³ – для воды [10]. Результаты обрабатывали статистически [11], ошибка определения не превышала 10% для гидробионтов и донных отложений и 20% – для воды.

Результаты и обсуждение. Радиоэкологическое исследование ^{210}Po на всей акватории Чёрного моря проводилось нами в 1998–2013 гг. Концентрация ^{210}Po в поверхностной воде открытой части моря определялась на уровне 1,0 мБк·дм⁻³. Ее величина увеличивалась в пробах из районов, приближенных к Днепровско-Бугскому лиману (1,0–1,5 мБк·дм⁻³), и в устьевой зоне Дуная (2,1 мБк·дм⁻³), что может быть обусловлено разными седиментационными потоками (рис. 1) [12, 13].

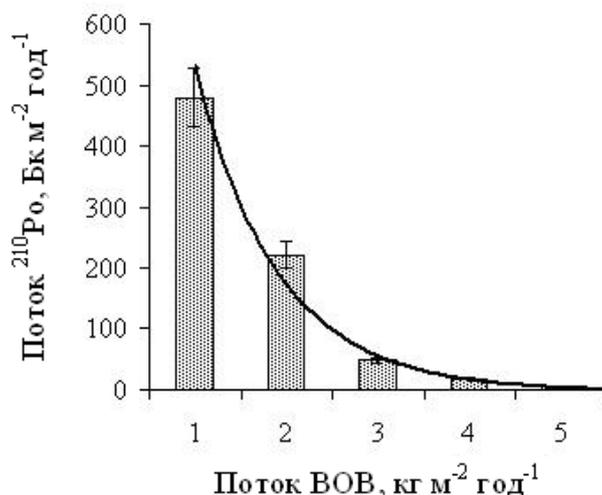


Рис. 1 Зависимость потоков ^{210}Po в слой 0-1 см донных отложений северо-западной части Чёрного моря от седиментационных потоков в разных его районах: 1 – устьевая зона Дуная, 2 – Днепровско-Бугский лиман, 3 – шельф, 4 – материковый склон, 5 – глубоководная зона

В донных отложениях концентрации ^{210}Po варьировали от 5 до 500 Бк·кг⁻¹ сухой массы с самыми высокими их значениями в северо-западной части моря в районе периферии западного циклонического круговорота [12]. Максимальные концентрации ^{210}Po в донных отложениях из восточной части Чёрного моря достигали 250 Бк·кг⁻¹ сухой массы [12]. Пространственное распределение ^{210}Po в донных отложениях зависит от количества присутствующего в них ВОВ, структуры субстратов, их гранулометрического состава, окислительных и восстановительных условий среды [12, 14, 15], так как полоний по своим химическим свойствам относится к поливалентным элементам. Значительный вынос взвеси в поверхностный слой донных отложений приустьевых зон рек Дунай и Днепр способствует поступлению в них такого количества ^{210}Po , которое

почти в 40–60 раз выше, чем в глубоководной части моря. Для донных отложений исследованных прибрежных районов и шельфовой зоны Черного моря эта разница достигала 3–8 раз.

Аккумуляция ^{210}Po разными видами черноморских гидробионтов происходит в соответствии с пищевой сетью [12, 14, 16]. Максимальные величины концентраций ^{210}Po в зоопланктоне варьировали от 2,75 до 3,8 Бк·кг⁻¹ сырой массы. Для рыб с величины зависели от принадлежности этих гидробионтов к разным экологическим группам и обусловлены типом их питания. В частности, самые высокие концентрации ^{210}Po в донных видах были определены в султанке (10,95 Бк·кг⁻¹ сырой массы), в придонных видах – в мерланге (17,5 Бк·кг⁻¹ сырой массы), в пелагических – в хамсе (52,2 Бк·кг⁻¹ сырой массы). Уровень аккумуляции ^{210}Po в моллюсках изменялся в зависимости от их видовой принадлежности, типа питания и стадий гаметогенеза [14, 16]. Исследованные моллюски по их способности аккумуляции ^{210}Po представлены в виде ряда: *C. gigas* > *M. galloprovincialis* > *A. inaequalis* > *O. edulis* > *N. nerithea*, а максимальные концентрации ^{210}Po в этих гидробионтах (Бк·кг⁻¹ сырой массы) соответствовали ряду 69,7 > 60 > 32,2 > 31,2 > 7,7 [14, 16].

Максимальные уровни аккумуляции ^{210}Po макрофитами из прибрежных районов Севастопольского морского региона (Бк·кг⁻¹ сырой массы) уменьшаются в ряду: лауренсия (2,08) > цистозира (1,89) > энтероморфа (1,11) \cong ульва (1,08) [12]. Установлено существенное различие аккумуляционной способности обитающих в разных экологических условиях на филлофорном поле Зернова (ФПЗ) и малом филлофорном поле (МФП) в Каркинитском заливе двух видов филлофоры, а именно, *C. truncatus* (26,4 и 15,6 Бк·кг⁻¹ сырой массы, соответственно) и *Ph. crispa* из МФП (6,7 Бк·кг⁻¹ сырой массы), что может быть обусловлено их видовыми различиями и экологическим состоянием среды обитания [17].

Выводы. 1. Районы материкового склона, шельфа и приустьевых зон рек Днепр и Дунай служат основными источниками поступления взвешенного органического вещества и ассоциированного с ним ^{210}Po в глубоководную часть Чёрного моря. **2.** Уровни аккумуляции ^{210}Po черноморскими рыбами зависят от их принадлежности к разным экологическим группам, вида и типа питания. **3.** Способность черноморских моллюсков аккумуляции ^{210}Po зависит от их видовой принадлежности, типа питания и стадий гаметогенеза. **4.** Аккумуляционная способность черноморских красных, бурых и зеленых макроводорослей в отношении ^{210}Po зависит от их видовой принадлежности. Существенное различие уровней аккумуляции этого радионуклида филлофорой может быть обусловлено ее видовыми различиями и экологическими условиями обитания.

Благодарности. Автор выражает свою искреннюю благодарность всем коллегам, осуществлявшим отбор проб на НИС «Проф. Водяницкий» и маломерных судах ИнБИОМ НАНУ / ИМБИ РАН, поддерживающим эти исследования своими ценными советами, а также всем соавторам работ: проф., д. б. н. Егорову В. Н., проф., д. б. н. Гулину С. Б., проф., д. б. н. Гаевской А. В., к. б. н. Болтачеву А. Р., к. б. н. Пирковой А. В., к. б. н. Корнийчук Ю. М., к. б. н. Юрахно В. М., к. б. н. Болтачевой Н. А., к. б. н. Столбову А. Я., к. б. н. Трусевичу В. В., к. б. н. Смирновой Ю. В., н. с. Поповичеву В. Н., вед. инж. Короткову А. А., вед. инж. Евтушенко Д. В. и вед. инж. Мосейченко И. Н.

1. Cherry R. D., Shannon L. V. The alpha radioactivity of marine organisms // Atomic Energy Rev. 1974. Vol. 12. P. 9–45.

2. Aarkrog A., Baxter M. S. et al. A comparison of doses from ^{137}Cs and ^{210}Po in marine food: A major international study // *J. Environ. Radioactivity*. 1997. Vol. 34, № 1. P.69–90.
3. Heyraud M., Cherry R. D. The correlation of ^{210}Po and ^{210}Pb enrichment in the sea-surface micro-layer with neustone biomass // *Cont. Shelf Res.* 1983. Vol. 1, Iss. 3. P. 283–293.
4. Heyraud M., Cherry R. D. Polonium-210 and lead-210 in marine food chains // *Marine Biology*. 1979. Vol. 52. P. 227–236.
5. 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, Austria: IAEA, 1988. P. 139–158.
6. Rutgers Van Der Loeff M. M., Geibert W. U/Th series nuclides as tracers of particle dynamics, scavenging and biogeochemical cycles in the oceans // *U/Th-series radionuclides in aquatic systems*. 2008. Vol. 13, chap. 7. P. 227–268.
7. McDonald P., Baxter M. S., Scott E. M. Technological enhancement of natural radionuclides in the marine environment // *J. Environ. Radioactivity*. 1996. Vol. 32, № 1-2. P.67–90.
8. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах окружающей среды / под общ. ред. А.Н. Марея и А.С. Зыковой. М.: Наука, 1980. 336 с.
9. Chen Q., Dalgaard H. et al. Determination of ^{210}Po and ^{210}Pb in mussel, fish, sediment, petroleum. Roskilde (Denmark): RISOE National Laboratory, 1998. 10 p.
10. 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.
11. Урбах В. Ю. Биометрические методы. М.: Наука, 1964. 362 с.
12. Лазоренко Г. Е. Распределение природного радионуклида ^{210}Po в компонентах экосистемы Черного моря // Радиэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г. Г. Поликарпова и В.Н. Егорова. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. С. 311–337.
13. Гулин С. Б., Поликарпов Г. Г. и др. Использование природных и искусственных радиотрас-серов для изучения биогеохимических процессов переноса, трансформации и депонирования радиоактивных и химических загрязнений в условиях окислительно–восстановительной водной среды Чёрного моря // Радиэкология: успехи и перспективы: междунар. конф., 3–7 окт. 1994 г. Севастополь: ИнБИОМ, 1996. С. 326–342.
14. Lazorenko G. E., Polikarpov G. G., Osvath I. ^{210}Po accumulation by components of the Black Sea ecosystem // *Radioprotection*. 2009. Vol. 44, № 5. P. 981–986.
15. Wei C.-L., Murray J. W. The behavior of scavenged isotopes in marine anoxic environments: ^{210}Pb and ^{210}Po in water column of the Black Sea // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1994. Vol. 58, Iss. 7. P. 1795–1812.
16. Lazorenko G. E., Polikarpov G. G., Pirkova A. V., Osvath I. Naturally occurring radionuclide ^{210}Po in the Black Sea shellfishes // *Морской экологический журнал*. 2010. Vol. IX, No 3. P.43–48.
17. Лазоренко Г. Е. ^{210}Po как природный индикатор видовой принадлежности и экологического состояния филлофоры в заповедных зонах северо-западной части Черного моря // Биоразнообразии и устойчивое развитие: матер. докл. III междунар. научно-практ. конф. (15-19 сент. 2014 г., Симферополь). Симферополь, 2014. С. 181–183.

**^{210}Po IN THE BLACK SEA ECOSYSTEM:
DELIVERY, MIGRATION AND ACCUMULATION BY HYDROBIONTS**

G. E. Lazorenko

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS, Sevastopol, RF, g.e.lazorenko@gmail.com

The results of the study of ^{210}Po in the ecosystem of the Black Sea are presented. It is shown that the spatial distribution of this natural radionuclide in the water is determined by the amount of suspended organic matter, and in the bottom sediments by biosedimentation processes. The levels of ^{210}Po accumulation by hydrobionts are increasing from macroalgae to fish and shellfish.

Key words: ^{210}Po , ecosystem, Black Sea, migration, accumulation, hydrobionts