

УДК 631.438(481-922.1)

**РАДИОНУКЛИДЫ В ПОЧВЕ ТИПИЧНОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЫ
И ПОД КОЛОНИЕЙ ПТИЦ В РАЙОНЕ РОССИЙСКОГО ПОСЕЛКА БАРЕНЦБУРГ
(АРХИПЕЛАГ ШПИЦБЕРГЕН)**

*Лебедева Н.В., Усягина И.С., Валуйская Д.А.**(Мурманский морской биологический ин-т РАН, г. Мурманск)*

e-mail: lebedeva@mmbi.info

Архипелаг Шпицберген, омываемый Гренландским и Баренцевым морями, расположен в высокоширотной Арктике (74—81° с.ш., 10—35° в.д.) на расстоянии около 700 км от ближайшего материкового побережья и примерно в 1000 км от северного полюса. Наземные экосистемы архипелага, как и других районов Арктики, хрупки и уязвимы, что связано с замедленными процессами почвообразования в условиях низкой температуры. Промышленная деятельность на Шпицбергене в XX в. ограничивалась угольными разработками Норвегии и России. В настоящее время возрастает интенсивность грузовых и транспортных потоков, бурно развивается туризм. В начале XXI в. на Шпицбергене зарегистрированы изменение количества осадков и значимое повышение зимней температуры [1]. Динамичное изменение климата в сочетании с антропогенным влиянием вынуждает следить за процессами, происходящими в наземных экосистемах, в том числе особенностями миграции и аккумуляции радионуклидов в ландшафтах разного типа. Основные первичные источники поступления искусственных радионуклидов в высоких широтах Арктики — глобальные выпадения после испытаний ядерного оружия во второй половине XX в., промышленные и другие аварии, сброс радиоактивных отходов и др. [2—5]. Вторичными источниками загрязнения могут служить зоны интенсивного таяния ледников [6]. Биоаккумуляция и биоседimentация искусственных изотопов могут происходить на птичьих базарах, в местах массового скопления и гибели рыб, моллюсков, макрофитов.

Морские птицы играют большую роль в круговороте веществ в экосистемах Арктики. Потребляя морские организмы в пищу и формируя крупные колонии на побережьях, птицы выносят органические вещества из морских экосистем на сушу, выкармливая потомство. Это приводит к аккумуляции поллютантов, в том числе радионуклидов в почве птичьих базаров [7—9].

Цель настоящего исследования — выяснить особенности распределения естественных ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th и искусственных радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs в почве двух разных биотопов: под вертикальной скальной колонией морских птиц и на пологом склоне с типичной арктической тундровой растительностью на Шпицбергене.

Методика. Сбор почвенных образцов выполнен в июне 2018 г. в двух разных биотопах на о-ве Западный Шпицберген: на побережье залива Колесбукта (арктическая тундра) (78°07'35" с.ш., 15°01'42" в.д.) и в окрестностях российского пос. Баренцбург (колония птиц) (78°04'25" с.ш., 14°12'50" в.д.). Биотоп «арктическая тундра» представляет собой слабо наклоненный к морю плакор в перепаде высот 17—30 м н.у.м. с типичной растительностью среднеарктической тундровой зоны. Биотоп «колония птиц» представляет собой крутой склон под небольшой колонией птиц на скальных выходах в градиенте высот 49—180 м над уровнем моря с типичной орнитогенной почвой и растительностью на восточном побережье Гренфьорда возле северной границы пос. Баренцбург. В состав колонии морских птиц общей численностью 210—235 пар входят люрики *Alle alle* (доминируют), обыкновенные чистики *Cerphus grylle* и бургомистры *Larus hyperboreus*. Здесь гнездятся также белощекие казарки *Branta leucopsis*, кормовой стацией которых являются тундровые местообитания [10]. Глубина органо-аккумулятивного горизонта почвы варьирует по склону сверху вниз от 2 до 24 см [10].

В каждом биотопе в шести пунктах через каждые 50 м склона в направлении побережья отбирали по две пробы на расстоянии 10 м одна от другой на одной и той же высоте (всего 24). Объем почвенного образца составлял 10×10×5 см.

Образцы почвы выдерживали в сушильном шкафу до постоянного веса при температуре до 105 °С, измельчали и просеивали через сито с

порами диаметром 2 мм. Перед измерением радиоактивности счетные образцы взвешивали и упаковывали в сосуды стандартной геометрической формы объемом 100 мл. Удельную активность ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra и ^{232}Th в счетных образцах определяли по аттестованной методике [11] на портативном гамма-спектрометре с детектором из особо чистого германия InSpector-2000 (США) с использованием свинцовой защиты с учетом фоновых и приборных помех. Энергетическое разрешение прибора по линии 121,8 (^{152}Eu) и 1332,5 кэВ (^{60}Co) составляет 1,22 и 1,93 кэВ соответственно. Эффективность регистрации γ -квантов 40%. Время измерения радиоактивности образцов составляло 12—24 ч. Спектры анализировали с помощью программного обеспечения Genie-2000 (США). Спектрометр градуирован с помощью объемных мер специального назначения с наполнителями плотностью 0,2—1,65 г/см³.

Предварительную подготовку проб и измерение ^{90}Sr проводили радиохимическим методом по аттестованной методике [12], предназначенной для радиоэкологического мониторинга почвы, донных осадков, растительности, водорослей и донных животных. Подготовка пробы основана на кислотном выщелачивании с последующим многостадийным осаждением для получения раствора, содержащего ^{90}Sr без примесей. Полученный раствор выдерживали в течение 14 сут до установления равновесия между ^{90}Sr и его дочерним радионуклидом ^{90}Y . Удель-

ную активность ^{90}Sr в счетном образце определяли по измеренной активности ^{90}Y . Доверительную погрешность измерения объемной активности определяемых радионуклидов в пробе рассчитывали с учетом неисключенных остатков систематической и случайной погрешности измерения. Анализ радионуклидов был выполнен в лаборатории океанографии и радиоэкологии ММБИ РАН.

Статистический анализ данных выполнен стандартными методами [13]. При необходимости применения параметрических методов статистики удельную активность логарифмировали. Применяли линейный регрессионный, дисперсионный анализ, непараметрический критерий Манна—Уитни. Для исследования вклада переменных в варьирование дисперсии удельной активности радионуклидов в почве выполняли факторный анализ методом главных компонентов. Переменные предварительно стандартизировали. Для интерпретации факторных нагрузок применяли ортогональное вращение преобразованной матрицы данных.

Результаты и обсуждение. Радионуклиды в почве под колонией птиц. Содержание искусственных радионуклидов в орнитогенной почве в окрестностях пос. Баренцбург было относительно низким (см. таблицу). Удельная активность ^{137}Cs и ^{226}Ra в почве под крупной колонией птиц Криккефеллета в районе залива Конгсфьорд (Шпицберген) существенно выше (критерий Манна—Уитни: $z = 3,1$, $P = 0,0003$ и

Удельная активность искусственных и естественных радионуклидов в орнитогенной почве под колониями морских птиц и в почве типичной арктической тундры на Шпицбергене, Бк/кг сухого вещества

Пункт исследований	^{40}K	^{90}Sr	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	Источник
Колония птиц						
Баренцбург ($n = 12$)	187—860* 470 ± 70**	0,03—15 4 ± 1	10—50 33 ± 4	28—55 41 ± 2	19—52 34 ± 3	Настоящая статья
Криккефеллет ($n = 5$)	356—458 403 ± 19	—	92—128 109 ± 7	54—88 70 ± 6	17—22 19 ± 1	[14]
Арктическая тундра						
Колесбукта ($n = 12$)	227—868 376 ± 50	3—124 33 ± 13	10—140 56 ± 11	20—45 32 ± 3	15—46 30 ± 3	Настоящая статья
Конгсфьорд ($n = 13$)	78—558 369 ± 42	—	5—163 46 ± 13	22—248 69 ± 18	10—35 24 ± 2	[14]

*Минимальная — максимальная.

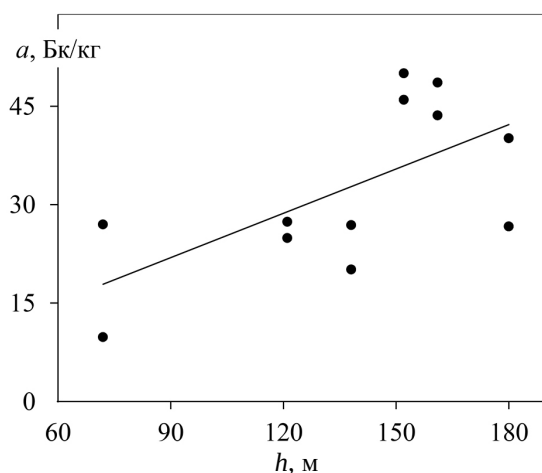
**Средняя ± стандартная ошибка.

$z = 3$, $P = 0,006$ соответственно), ^{232}Th — ниже ($z = 2,8$, $P = 0,0013$), чем в почве на склоне под колонией птиц в окрестностях Баренцбурга [14]. Удельная активность ^{40}K достоверно не различалась в почве под разными колониями.

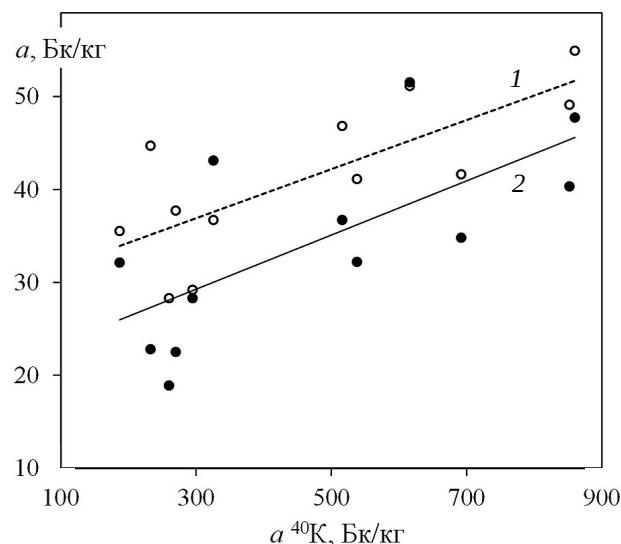
Метод главных компонент показал, что 77,1% общей дисперсии удельной активности радионуклидов в исследуемой почве под колонией морских птиц в окрестностях Баренцбурга объясняется двумя факторами: первый (53,5% общей дисперсии) отрицательно коррелирует с удельной активностью естественных радионуклидов ^{40}K ($r = -0,92$), ^{226}Ra ($r = -0,9$) и ^{232}Th ($r = -0,84$), второй, объясняющий 23,6% общей изменчивости, — положительно коррелирует с удельной активностью ^{137}Cs ($r = 0,91$). Таким образом, общую изменчивость радионуклидов в орнитогенной почве птичьего базара вблизи пос. Баренцбург определяют преимущественно естественные радиоактивные изотопы.

Отмечена умеренная положительная взаимосвязь удельной активности ^{137}Cs в почве под птичьим базаром с высотой ($y = 0,2x + 1,7$, $R^2 = 0,4074$) (рис. 1). Птицы гнездились на скале, тогда как гуано и другие продукты жизнедеятельности депонировались ниже по склону. Больше всего ^{137}Cs накапливалось непосредственно под скалой, где были гнезда птиц, ниже по склону, куда смывались органические вещества, вынесенные морскими птицами из моря, его удельная активность уменьшалась ($r = 0,64$, $P < 0,05$).

Для других радионуклидов аналогичная взаимосвязь не обнаружена. Удельная актив-



Р и с. 1. Зависимость удельной активности ^{137}Cs (●) от высоты на склоне под колонией птиц в окрестностях пос. Баренцбург



Р и с. 2. Взаимосвязь между удельной радиоактивностью ^{40}K , ^{226}Ra (○) и ^{232}Th (●) в почве на склоне под колонией птиц в Баренцбурге: 1, 2 — линия регрессии ^{226}Ra и ^{232}Th соответственно

ность естественных радионуклидов положительно коррелировала в орнитогенной почве: ^{40}K и ^{226}Ra ($r = 0,77$, $P < 0,05$), ^{40}K и ^{232}Th ($r = 0,69$, $P < 0,05$), ^{226}Ra и ^{232}Th ($r = 0,7$, $P < 0,05$) (рис. 2). Уравнения линейной регрессии между удельной радиоактивностью ^{40}K и ^{226}Ra — $y = 0,03x + 29,0$ ($R^2 = 0,5883$), ^{40}K и ^{232}Th — $y = 0,03x + 20,6$ ($R^2 = 0,4772$).

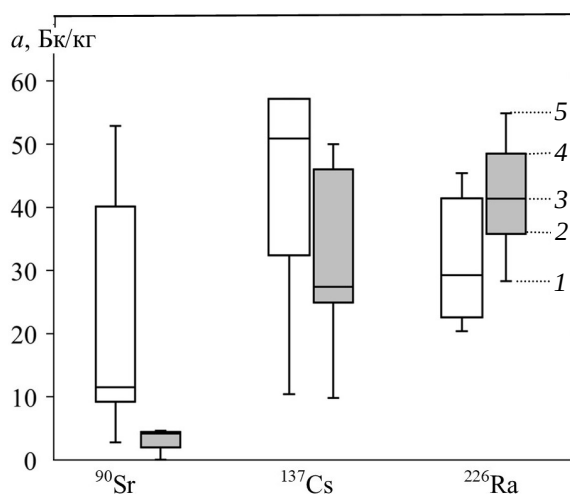
Радионуклиды в почве арктической тундры. На пологом склоне перепад высот составлял всего 13 м. Удельная активность искусственных радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs была низкой (см. таблицу). Удельная активность ^{40}K , ^{137}Cs и ^{232}Th варьировала в близких пределах в почве типичной арктической тундры в районе заливов Колесбукта и Конгсфьорд: различия были незначимы. Удельная активность ^{226}Ra варьировала в более широких пределах в почве арктической тундры в районе Конгсфьорда по сравнению с почвой в аналогичном биотопе в районе Колесбукты ($z = 2,3$, $P = 0,022$) [14].

Анализ методом главных компонент показал, что 59,8% общей дисперсии удельной активности в исследуемых почвах данного биотопа объясняется двумя факторами: первый (34,4% общей дисперсии) отрицательно коррелирует со ^{90}Sr ($r = -0,79$) и ^{137}Cs ($r = -0,85$), второй, объясняющий 25,4% общей изменчивости, — отрицательно коррелирует с ^{232}Th ($r = -0,98$). Таким образом, общую изменчивость радионуклидов в типичной почве аркти-

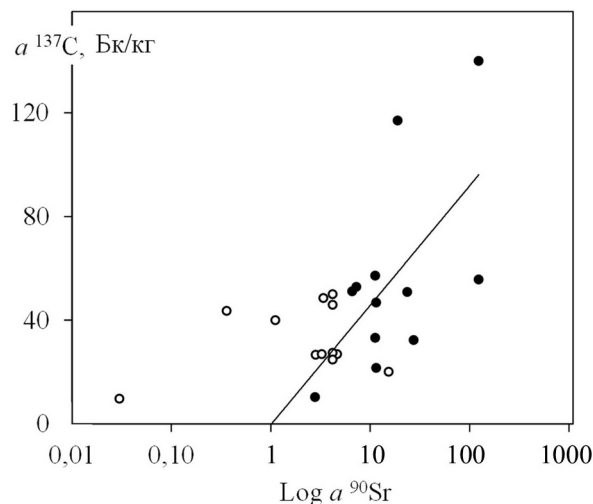
ческой тундры определяют искусственные радиоактивные изотопы. Достоверная взаимосвязь между удельной активностью исследованных радионуклидов не обнаружена.

Сравнительный анализ радионуклидов в почве разных биотопов. Удельная активность искусственных радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs была существенно выше в почве типичной арктической тундры: ^{90}Sr ($z = 3,3$, $P = 0,0011$), ^{137}Cs ($z = 2,2$, $P = 0,0262$), тогда как удельная активность ^{226}Ra была выше под птичьим базаром ($z = 2,3$, $P = 0,0226$) (рис. 3).

Обнаружена взаимосвязь между логарифмом удельной активности ^{90}Sr и удельной активностью ^{137}Cs в почве типичной арктической тундры ($y = 20 \ln x - 0,27$, $R^2 = 0,3607$), тогда как эта взаимосвязь в орнитогенной почве недостоверна (рис. 4). Аккумуляция искусственных радионуклидов может быть объяснена меньшим вымыванием из почвы и депонированием на месте при незначительном уклоне рельефа. Исследования [15] показывают, что почва вблизи крупной колонии морских птиц на Шпицбергене имеет коэффициент обогащения 8 для ^{137}Cs и 2 для ^{226}Ra по сравнению с радионуклидами в почве арктической тундры вблизи колонии. Авторы настоящей статьи показали, что в орнитогенной почве на крутом склоне депонировалось в среднем в 2 раза меньше ^{137}Cs , чем в почве арктической тундры. Тем не менее непосредственно под скалой, где концентрировались птицы, радиоактивность ^{137}Cs была близка к



Р и с. 3. Распределение удельной активности ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{226}Ra в биотопах «арктическая тундра» (□) и колония птиц (■): 1, 5 — минимум и максимум; 2, 4 — нижний и верхний квартиль соответственно; 3 — медиана



Р и с. 4. Взаимосвязь логарифма удельной активности ^{90}Sr и удельной активности ^{137}Cs в почве двух биотопов: «арктическая тундра» (○) и «колония птиц» (●): — — «колония птиц»

средней концентрации в почве арктической тундры. Удельная активность ^{90}Sr также была выше в тундровом биотопе. Это может быть связано с мозаичным выпадением искусственных радионуклидов из атмосферы.

Заключение. Для антропогенного ^{137}Cs удельная активность в почве близка или ниже ранее установленной для аналогичных биотопов на Шпицбергене [7, 8, 14]. Небольшое поселение морских птиц на скале над крутым склоном, исследованное в районе пос. Баренцбург, по-видимому, обеспечивает вынос небольшого объема органических веществ из морской экосистемы по сравнению со значительно более крупным птичьим базаром [7]. Однако наибольшая удельная активность ^{137}Cs непосредственно под гнездами птиц может свидетельствовать в пользу механизма выноса этого радионуклида из морской экосистемы и его аккумуляции в современной орнитогенной почве. Возраст почвы в этой части склона был установлен с помощью радиоуглеродного анализа [10]. Следует отметить, что над скалой, где гнездятся птицы, расположено обширное плато, на котором в холодный период года с ноября по май скапливаются большие объемы льда и снега. При их таянии образуются мощные потоки воды, что, вероятно, приводит к смыванию растворенного в воде ^{137}Cs , не связанного с частицами почвы. Кроме того, за счет крутизны склона под колонией происходит вымывание веществ из почвы вниз по склону.

На пологом склоне в почве типичной арктической тундры отмечена большая удельная активность искусственных радионуклидов. Их аккумуляция в почве этого биотопа может быть объяснена меньшим вымыванием из почвы. Таким образом, можно предположить, что распределение искусственных радионуклидов может быть связано с несколькими независимыми факторами, например, особенностями формирования почвы, рельефом и др.

Авторы признательны Н.И. Мещерякову и О.Л. Зиминной за содействие во время полевых исследований на арх. Шпицберген. Финансирование исследований осуществлено по Государственному заданию ММБИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Førlund E., Benestad R., Hanssen-Bauer I. e.a. Temperature and precipitation development at Svalbard 1900—2100. — *Ad. Meteor.*, 2011, doi:10.1155/2011/893790.
2. Kershaw P., McCubbin D., Leonard K. Continuing contamination of north Atlantic and Arctic waters by Sellafield radionuclides. — *Sci. Total Environ.*, 1999, v. 237, p. 119—132.
3. Matishov D., Matishov G. Radioecology in Northern European Seas. Berlin: Springer Verlag, 2004. 336 p.
4. Григорьев А.Г., Нестерова Е.Н., Неевин И.А., Холмянский М.А. Схема техногенного радиоактивного загрязнения российской Арктики. — *Проблемы Арктики и Антарктики*, 2017, вып. 4, с. 16—22.
5. Huang D., Yu T., Bao H. e.a. Vertical profiles of ^{90}Sr activities in seawater in the Greenland Sea, Chukchi Sea and Arctic Ocean. — *Marine Poll. Bul.*, 2019, v. 141, p. 299—306.
6. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Щипа Е., Риссанен К. Радионуклиды в экосистеме региона Баренцева и Карского морей. Апатиты, КНЦ РАН, 1994. 337 с.
7. Dowdall M., Gwynn J., Gabrielsen G., Lind B. Assessment of elevated radionuclide levels in soils associated with an avian colony in a high arctic environment. — *Soil Sediment. Contam.*, 2005, v. 14, № 1, p. 1—11.
8. Dowdall M., Gwynn J., Moran C. e.a. Organic soil as a radionuclide sink in a High Arctic environment. — *J. Radioan. Nucl. Chem.*, 2005, v. 266, № 2, p. 217—223.
9. Kristiansen S., Leinaas H., Herzke D. e.a. Seabird-transported contaminants are reflected in the Arctic tundra, but not in its soil-dwelling springtails (Collembola). — *Environ. Sci. Technol.*, 2019, v. 53, № 21, p. 12835—12845.
10. Лебедева Н.В., Таскаева А.А., Мелехина Е.Н., Зазовская Э.П. Беспозвоночные в градиенте почв разного возраста под колонией морских птиц в районе Гренфьорда (Шпицберген, Арктика). — *Кавказский энтомолог. бюл.*, 2020, т. 16, вып. 2, с. 283—294.
11. Методика выполнения измерений удельной активности стронция-90 в пробах окружающей среды на сцинтилляционной установке LS 6500. Мурманск, ММБИ КНЦ РАН, ФГУП НПО «Радиовый институт им. В.Г. Хлопина», 2015. 19 с.
12. Методика измерений активности (удельной активности) гамма-излучающих радионуклидов в счетных образцах с применением спектрометра энергии гамма-излучения CANBERRA с программным обеспечением GENIE-2000. Мурманск, ММБИ КНЦ РАН, ООО НТЦ «РАДЭК», 2015. 44 с.
13. Holmes S., Huber W. Modern Statistics for Modern Biology. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2019. 402 p.
14. Dowdall M., Gwynn J., Moran C. e.a. Uptake of radionuclides by vegetation at a High Arctic location. — *Environ. Poll.*, 2005, v. 133, № 2, p. 327—332.
15. Gwynn J., Dowdall M., Davids C. e.a. The radiological environment of Svalbard. — *Polar Res.*, 2004, v. 23, № 2, p. 167—180.

Поступила в Редакцию 22.04.21

УДК 620.93

КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ АЭС

Сухоруков Ю.Г., Кругликов П.А., Смолкин Ю.В., Кулаков Е.Н. (ОАО «НПО ЦКТИ», г. Санкт-Петербург)
e-mail: scheme@ckti.ru

Важным условием повышения экономической эффективности АЭС является технико-экономическая оптимизация структуры и параметров тепловой схемы, конструктивных и компоновочных решений по оборудованию. В настоящее время в ядерной энергетике нашей страны, как и за рубежом, в качестве критерия экономической эффективности АЭС принят по-

казатель $LCOE$ — средняя расчетная себестоимость электроэнергии (нормированная стоимость электроэнергии) на протяжении всего жизненного цикла: проектирование, сооружение, эксплуатация и вывод из эксплуатации. Суть этого показателя заключается в том, что ежегодные затраты на протяжении жизненного цикла, а также ежегодно отпущенное количест-