

Е. А. Клементьева¹, С. В. Овсянникова², А. Н. Никитин¹¹Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь²Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь**ДИНАМИКА ИЗОТОПОВ ²¹⁰Pb И ²¹⁰Po В ЕСТЕСТВЕННЫХ
ЛУГОВЫХ ЭКОСИСТЕМАХ И АГРОФИТОЦЕНОЗАХ
С РЕГУЛЯРНЫМ ВНЕСЕНИЕМ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ**

Изучено распределение радионуклидов ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po в почвах естественных луговых экосистем и в пахотных горизонтах почв агроэкосистем юго-восточного региона Республики Беларусь. Выявлено отличие между содержанием радионуклидов в верхнем 0–5-сантиметровом слое органогенного горизонта и в нижележащих слоях почв естественных луговых экосистем. Характер распределения ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po по вертикальным профилям луговых почв позволяет предположить, что поступление радионуклидов в почвенный покров в основном обусловлено аэрозольными выпадениями из атмосферы и их биогенным накоплением в верхней части органогенного горизонта. Показано, что в пахотном горизонте сельскохозяйственных почв, в которые регулярно вносятся минеральные удобрения, содержание ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po линейно зависит от концентрации подвижного фосфора. Уменьшение кислотности почвенной среды способствует снижению биологической доступности радионуклидов ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po и их накоплению в растительной продукции. Определены коэффициенты перехода ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po в овощные культуры, широко распространенные на территории Беларуси. Установлено, что коэффициенты перехода ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po возрастают в ряду овощных культур морковь – капуста и для ²¹⁰Po они вдвое выше, чем для ²¹⁰Pb.

Ключевые слова: радионуклиды ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po, почва, овощные культуры.

E. A. Klementjeva¹, S. V. Ovsiannikova², A. N. Nikitin¹¹Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus²Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus**DYNAMICS OF ISOTOPES ²¹⁰Pb AND ²¹⁰Po IN NATURAL MEADOW ECOSYSTEMS
AND AGROPHYTOCENOSES WITH THE REGULAR APPLICATION OF PHOSPHORUS FERTILIZERS**

Distribution of ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po radionuclides in the soils of natural meadow ecosystems and in the arable soil horizons of agroecosystems of the south-eastern region of the Republic of Belarus has been investigated. The difference between the radionuclides content in the upper 0–5-cm layers of organic horizons and in the underlying layers of soils of natural meadow ecosystems has been revealed. The distribution of ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po along the vertical profiles of meadow soils allows assuming that the intake of radionuclides in to soil cover is mainly due to aerosol deposition from atmosphere and their biogenic accumulation in the upper part of the organic horizons. It was shown that in arable horizon of agricultural soils, which are regularly fertilized, content of ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po depends linearly on concentration of mobile phosphorus. Reducing the acidity of soil medium promotes to the reduction of ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po bioavailability and their accumulation in vegetative production. The transfer factors of ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po for vegetables, which are widespread on the territory of Belarus, were determined. It was established that the transfer factors of ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po are increased in the next order: carrot – potato – cabbage and those for ²¹⁰Po were twice as for ²¹⁰Pb.

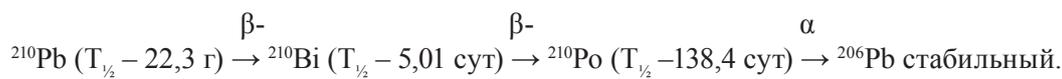
Keywords: ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po radionuclides, soil, vegetables.

Введение. Радионуклиды ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po, являющиеся промежуточными членами радиоактивного ряда ²³⁸U, широко представлены в наземных экосистемах. Они поступают в почву с аэрозольными частицами в результате радиоактивного распада повсеместно выделяющегося в атмосферу газообразного ²²²Rn и могут концентрироваться на участках с повышенной интенсивностью радоновых потоков. Помимо природных источников эти радионуклиды поступают в наземные экосистемы из техногенных источников: при сжигании ископаемого топлива, промышленной переработке урановых, фосфатных и свинцовых руд, использовании тетраэтилсвинца для автомобильных двигателей [1].

Интерес к радионуклидам ^{210}Pb и ^{210}Po в 40–50-е годы XIX в. был связан с развитием ядерной физики и осознанием возможной угрозы мировой ядерной катастрофы. Практически во всех крупных ядерных центрах СССР, США и Европы начали действовать исследовательские и клинические подразделения, где специалисты различных дисциплин изучали воздействие ионизирующего излучения на биологические объекты. В этот же период были развернуты исследования по изучению радионуклидов и процессов их переноса в биосфере, обусловленные в первую очередь масштабными испытаниями ядерного оружия [2]. Особый интерес к ^{210}Pb и ^{210}Po связан с их высокой радиотоксичностью, способностью накапливаться в некоторых пищевых продуктах, таких как морепродукты, мясо северных оленей и карibu, и существенным их вкладом (до 35 %) в общую дозу внутреннего облучения человека, обусловленную поступлением в организм естественных радионуклидов. Высокая радиотоксичность и заметный вклад ^{210}Pb и ^{210}Po в дозу облучения человека стимулировали исследования по биокинетике и биологическим эффектам радионуклидов [1, 3, 4].

В последние годы в научной литературе все большее внимание уделяется изучению состояния и миграции радионуклидов ^{210}Pb и ^{210}Po в почве как основном элементе наземных экосистем, от которого существенно зависит перераспределение радионуклидов между компонентами окружающей среды. Развитие промышленного производства и химизация земледелия неизбежно ведут к увеличению концентрации радионуклидов в почвенном покрове. Это происходит в результате выноса и распространения радионуклидов, содержащихся в промышленных отходах и минеральных удобрениях, в том числе производимых из фосфатов [1]. Присутствующие в окружающей среде радионуклиды свинца и полония представлены относительно долгоживущими ^{210}Pb и ^{210}Po , а так же короткоживущими $^{211,212,214}\text{Pb}$ и $^{212,214,215,216,218}\text{Po}$ [5].

Радионуклиды ^{210}Pb и ^{210}Po связаны цепочкой последовательных ядерных превращений:



В результате распада ^{210}Pb , сопровождающегося испусканием мягкого бета-излучения с максимальной энергией ($E_{\beta \text{ max}} = 0,635 \text{ МэВ}$) и низкоэнергетических гамма-квантов ($E_{\gamma} = 0,0465 \text{ МэВ}$), образуется бета-излучающий ^{210}Bi ($E_{\beta \text{ max}} = 1,16 \text{ МэВ}$), который при последующем бета-распаде превращается в альфа-излучающий ^{210}Po ($E_{\alpha} = 5,720 \text{ МэВ}$). Лишь незначительная часть ядер ^{210}Po ($1,7 \cdot 10^{-6}$) распадается с испусканием гамма-квантов с энергией 0,803 МэВ [5].

Среди естественных радионуклидов ^{210}Pb и ^{210}Po представляют наибольшую биологическую опасность. ^{210}Pb является одним из радиоактивных изотопов свинца – остеотропного химического элемента, который активно участвует в обменных процессах и концентрируется в костных тканях. В результате распада ^{210}Pb в местах его локализации происходит накопление бета-излучающего ^{210}Bi и альфа-излучающего ^{210}Po .

Биологический период полувыведения ^{210}Pb из скелета составляет около 27 лет. Повышенное содержание этого радионуклида в организме человека может приводить к повреждению костного мозга, печени, почек, злокачественным новообразованиям.

Радиоактивный полоний способен проникать в организм человека через кожные покровы, особенно поврежденные. При ингаляционном поступлении ^{210}Po надолго задерживается в легочных тканях. В результате примерно 20 % радионуклида задерживается в легких и 75 % поступает в желудочно-кишечный тракт. При пероральном поступлении наибольшее содержание ^{210}Po отмечалось в почках, крови и лимфоузлах. Биологический период полувыведения ^{210}Po из организма человека составляет в среднем 80 сут. Накопление ^{210}Po в организме может приводить к циррозам печени, нефросклерозам, гиперплазии, катарактам, опухолям органов желудочно-кишечного тракта, легких, почек, щитовидной железы [6].

Высокая биологическая токсичность радионуклидов ^{210}Pb и ^{210}Po является причиной введения для них жестких санитарно-гигиенических нормативов (например, для воды – 0,20 и 0,12 Бк/кг соответственно) [7].

Исследования, проводившиеся в Республике Беларусь, в основном касались лишь материнского радионуклида ^{238}U [8–10]. Дочерним продуктам распада, таким как ^{210}Pb и ^{210}Po , не уделялось

должного внимания. Однако из-за их повышенной миграционной способности, биологической аккумуляции, более высокой радиотоксичности эти продукты распада ^{238}U представляют большую опасность, чем материнский радионуклид.

Цель настоящего исследования – изучение распределения радионуклидов ^{210}Pb и ^{210}Po в почвенном покрове юго-восточного региона Беларуси, анализ факторов, влияющих на их накопление в почвах, и определение коэффициентов перехода радионуклидов из сельскохозяйственных почв в продукцию растениеводства.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования служили образцы почв естественных луговых экосистем, а также сопряженные образцы растений и почв агроэкосистем. Отбор образцов осуществляли в 2011–2013 гг. на территории Гомельской области. Закладывали реперные площадки на участках, подвергавшихся агрохимической обработке, и отбирали на них хозяйственно полезные части овощных культур (морковь, картофель, капуста) и образцы почв, на которых они были выращены, в соответствии с методикой радиологического и агрохимического исследования [11]. Образцы почв естественных луговых экосистем отбирали послойно с шагом 5 см на глубину до 20 см от дневной поверхности почвы, образцы пахотных горизонтов почв отбирали буром Малькова на глубину 20 см (5 уколов на площадку).

Отобранные образцы почв тщательно перемешивали, просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм и высушивали на воздухе при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ до постоянного веса, после чего по стандартным методикам оценивали их агрохимические характеристики [12, 13].

Растительные образцы перед кулинарной обработкой и употреблением в пищу очищали, снимали кожуру при необходимости (с капусты удаляли внешние загрязненные листья) и тщательно промывали. После этого их высушивали на воздухе до постоянного веса. Для анализа использовали только съедобные части.

Методики определения содержания радионуклидов ^{210}Pb и ^{210}Po в образцах почв и растений основаны на выделении радионуклидов из анализируемых проб и регистрации их ионизирующих излучений. Активность ^{210}Po в образцах устанавливали по альфа-излучению радионуклида после его предварительной радиохимической очистки от мешающих альфа-излучателей и макрокомпонентов. Воздушно-сухие образцы почв и растительности кипятили со смесью концентрированных растворов азотной кислоты и пероксида водорода, выпаривая растворы досуха. Обработку повторяли несколько раз. Полученные нитраты переводили в хлориды, приливая небольшими порциями концентрированную соляную кислоту и выпаривая раствор. Процесс повторяли 3–4 раза. Твердый остаток растворяли в 1 моль/дм³ HCl, а полученный раствор фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента». К фильтрату добавляли аскорбиновую кислоту до обесцвечивания раствора. При этом формировались прочные комплексы ионов железа (III) с аскорбиновой кислотой. Затем в раствор помещали полированный медный диск, на котором осаждался полоний. Излучение ^{210}Po регистрировали альфа-спектрометром AlphaAnalyst фирмы Canberra, оснащенным полупроводниковыми детекторами А 450-20 АМ AlphaPips. Эффективность регистрации альфа-излучения радионуклидов составляла 30 %, минимальная детектируемая активность (МДА) – 0,001 Бк на пробу. Результаты измерений обрабатывали с помощью пакета прикладных программ Apex–Alpha V 1.2 фирмы Canberra.

Содержание ^{210}Pb в анализируемых пробах оценивали по активности дочернего ^{210}Bi после отделения висмута от свинца. Радиоактивный свинец выделяли из раствора путем совместного осаждения с нитратом стабильного свинца $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, который вводили в исходную пробу и использовали в качестве носителя радионуклида и для определения химического выхода элемента в ходе анализа. Не менее чем через 20–25 сут в полученном препарате с помощью радиометра LB-770PC (Berthold, Германия) измеряли активность накопленного ^{210}Bi , по которой оценивали активность ^{210}Pb . МДА ^{210}Bi составляла 0,033 Бк на пробу.

Методики определения содержания радионуклидов в образцах почв и растительности контролировали по результатам анализа стандартных проб МАГАТЭ с известным содержанием радионуклидов (IAEA-327, IAEA-437, IAEA-446, IAEA-447, IAEA-434, IAEA-444, IAEA-385).

Результаты и их обсуждение. В юго-восточном регионе Беларуси распространены преимущественно дерново-подзолистые супесчаные, песчаные и торфяно-болотные почвы. Местоположение участков и характеристики образцов 0–20-сантиметровых слоев почв приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Местоположение участков и характеристики почв

T a b l e 1. Location of sites and characteristics of soil

Участок	Географические координаты	Почва	pH _{KCl}	ОК _п , %	P ₂ O _{5подв} , мг/кг
<i>Естественные луговые экосистемы</i>					
Бардино Гомельского района	592920,8" с. ш. 30°	Дерново-подзолистая песчаная	6,0	2,46 ± 0,21	918 ± 68
Тартак Лельчицкого района	51°41'47,7" с. ш. 28°04'35,3" в. д.	Аллювиальная дерново-глеевая супесчаная	5,2	2,86 ± 0,24	1 766 ± 96
Боровое Лельчицкого района	51°42'51,3" с. ш. 28°04'48" в. д.	Аллювиальная торфянисто-глеевая	5,5	4,43 ± 0,27	1 352 ± 82
Стодоличи Лельчицкого района	51°44'25,6" с. ш. 28°29'51,5" в. д.	Заболоченная дерново-подзолистая песчаная	5,3	1,18 ± 0,14	1 218 ± 76
Чемерно Лельчицкого района	51°45'24,7" с. ш. 28°18'29,1" в. д.	Аллювиальная дерново-глеевая супесчаная	5,5	3,13 ± 0,25	933 ± 57
<i>Агрэкоэксістэмы (паісня)</i>					
Урицкое Гомельского района	52°28'07,1" с. ш. 30°48'08,9" в. д.	Дерново-подзолистая супесчаная	5,6	2,74 ± 0,22	1 622 ± 97
Красное Гомельского района	52°27'51,1" с. ш. 30°54'53,1" в. д.	Дерново-подзолистая супесчаная	5,8	2,64 ± 0,23	829 ± 54
Пролетарий Гомельского района	52°28'42,3" с. ш. 30°56'33,8" в. д.	Дерново-подзолистая супесчаная	5,5	2,59 ± 0,24	769,3 ± 47
Стреличево Хойникского района	51°48'29,0" с. ш. 29°55'18,1" в. д.	Дерново-подзолистая супесчаная	6,2	2,67 ± 0,23	498 ± 37
Судково Хойникского района	51°52'12,6" с. ш. 29°53'11,3" в. д.	Дерново-подзолистая супесчаная	6,4	2,91 ± 0,24	891 ± 56
Новоселки Хойникского района	51°49'13,3" с. ш. 29°52'01,3" в. д.	Дерново-подзолистая супесчаная	6,4	3,92 ± 0,30	688 ± 44
Дворище Хойникского района	51°51'00,7" с. ш. 29°55'00,1" в. д.	Дерново-подзолистая супесчаная	6,6	2,52 ± 0,22	532 ± 36

П р и м е ч а н и е. ОК_п – общее содержание органических компонентов в образцах почвы, % от массы абсолютно сухого вещества; pH_{KCl} – pH почвенной суспензии в растворе 1 моль/дм³ KCl; P₂O_{5подв} – содержание подвижного фосфора в почвенных образцах в расчете на абсолютно сухое вещество.

Результаты определения удельных активностей по ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po образцов почв, отобранных с разной глубины почвенных профилей естественных луговых экосистем, приведены на рис. 1.

Как видно из полученных данных, максимальные удельные активности были свойственны верхним 0–5-сантиметровым слоям органогенных горизонтов почв, а в нижележащих почвенных слоях они резко снижались. Установленное соотношение активностей радионуклидов (²¹⁰Po/²¹⁰Pb) в образцах 0–5-сантиметровых слоев почв составляло 0,24–0,31, что хорошо согласовалось с данными работы [14], где приведены аналогичные соотношения радионуклидов в атмосферных выпадениях (в среднем – 0,3). В зависимости от глубины соотношение радионуклидов изменялось до практически равновесных значений (в пределах аналитической неопределенности).

Полученные данные по относительному вертикальному распределению радионуклидов в почвах (рис. 2) показали, что в верхнем 0–5-сантиметровом слое содержится 77–83 % ²¹⁰Pb и 52–68 % ²¹⁰Po от общего запаса соответствующего радионуклида в 0–20-сантиметровом почвенном слое. Существенное сокращение содержания радионуклидов при переходе от верхнего к более глубоко залегающим почвенным слоям могло быть вызвано их поступлением в почву в составе аэрозольных выпадений и в результате биогенного накопления в верхней части органогенного горизонта. Содержащиеся в почве радионуклиды ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po могут быть природного происхождения, являясь дочерними продуктами распада ²³⁸U, а также поступать из антропогенных источников. Повышенное содержание ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po в верхней части почвенного профиля свидетельствует о том, что органогенный горизонт почвы обладает свойствами сорбционного барьера, препятствующего продвижению радионуклидов вглубь почвы.

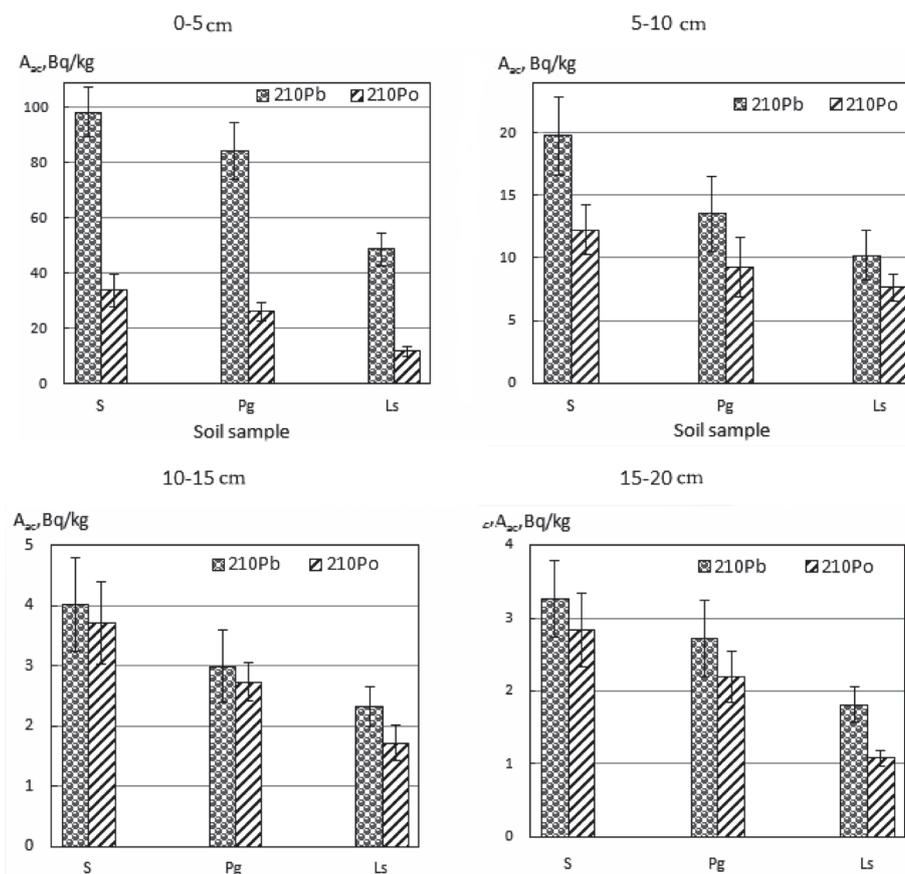


Рис. 1. Удельные активности по ^{210}Pb и ^{210}Po ($A_{уд}$, Бк/кг абсолютно сухой почвы) различных слоев почв естественных луговых экосистем: дерново-подзолистой песчаной (S), торфянисто-глеевой (Pg), аллювиальной дерново-глеевой супесчаной (Ls)

Fig. 1. Activity concentrations of ^{210}Pb и ^{210}Po ($A_{уд}$, Bq/kg of absolute dry soil) in different layers of soils of natural meadow ecosystems: sod podsolic sandy (S), peaty-gley (Pg), alluvial sod-gley loamy-sand (Ls)

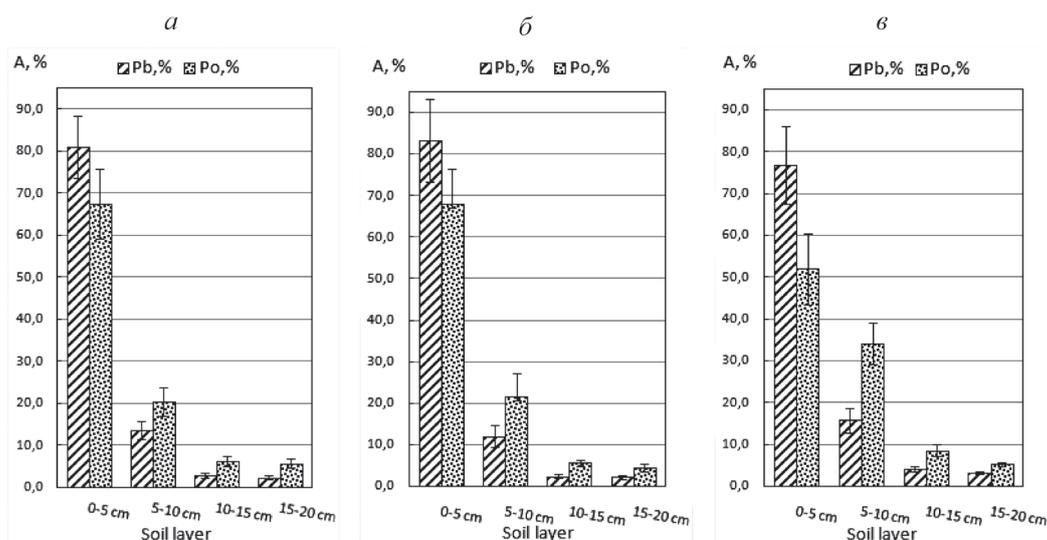


Рис. 2. Изменение относительного содержания ^{210}Pb и ^{210}Po (A, %) по вертикальным профилям почв естественных луговых экосистем: дерново-подзолистой песчаной (a), торфянисто-глеевой (b), аллювиальной дерново-глеевой супесчаной (c)

Fig. 2. The change in the relative content of ^{210}Pb and ^{210}Po (A, %) along the vertical soil profiles of the natural meadow ecosystems: sod podsolic sandy (a), peaty-gley (b), alluvial sod-gley loamy-sand (c)

На исследованных участках пахотных почв широко использовались фосфорные удобрения. Содержащиеся в них естественные радионуклиды могут мигрировать по цепи «удобрение – почва – растение – рацион человека» и служить дополнительным источником внутреннего облучения. Природные фосфориты, используемые для производства фосфорных удобрений, как правило, отличаются повышенной концентрацией радионуклидов урановых рядов. Концентрация радионуклидов урановых рядов в фосфорсодержащих удобрениях различных стран мира варьируется в пределах 70–2400 Бк/кг [15].

Длительное использование фосфорных удобрений повышает концентрацию радионуклидов в почвах. В зависимости от вида фосфорного удобрения, т. е. от технологии переработки фосфорсодержащего сырья, радионуклиды могут поступать в почву в различных химических формах и существенно отличаться по способности поступать в почвенные растворы и усваиваться растениями. Так, в фосфоритной муке относительное количество содержащихся в удобрении естественных радионуклидов в подвижной (условно биологически доступной) форме близко к соответствующим показателям в неудобренных почвах. В аммофосе, напротив, относительное количество естественных радионуклидов в подвижной форме выше, чем в неудобренных почвах. При этом максимальной подвижностью в почве отличаются изотопы урана, а минимальной – изотопы тория. Внесение удобрений в почву может изменять физико-химические формы нахождения радионуклидов, существенно увеличивая содержание биологически доступных растениям радионуклидов ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po [15].

Среднее содержание ^{210}Pb и ^{210}Po в изученных образцах пахотных горизонтов дерново-подзолистых супесчаных почв приведено в табл. 2. Удельная активность ^{210}Pb в пахотных горизонтах изученных дерново-подзолистых супесчаных почв составляет в среднем $(50,6 \pm 10,8)$ Бк/кг, а ^{210}Po – $(15,3 \pm 3,2)$ Бк/кг абсолютно сухого вещества при доверительной вероятности 95 % и условии подчинения полученных значений распределению Стьюдента.

Т а б л и ц а 2. Содержание ^{210}Pb и ^{210}Po в пахотных горизонтах дерново-подзолистых супесчаных почв

Table 2. Content of ^{210}Pb and ^{210}Po in the sod-podsolic loamy-sand soils

Радионуклид	Удельная активность почвы, Бк/кг		
	Среднее значение	Стандартное отклонение	Диапазон изменения
^{210}Pb	50,6	11,7	31,8 – 68,1
^{210}Po	15,3	3,4	11,4 – 21,5

Выявлены тесные связи между удельными активностями пахотных горизонтов почв по рассматриваемым радионуклидам, концентрацией в почве подвижного фосфора и кислотностью ($\text{pH}_{\text{КСЛ}}$) почвенной среды (рис. 3). Из полученных данных следует, что содержание ^{210}Pb и ^{210}Po в пахотном горизонте почв линейно возрастает с увеличением концентрации в почве подвижного фосфора и сокращается при увеличении pH почвенной среды. Тесная связь между удельными активностями пахотных горизонтов почв по ^{210}Pb и ^{210}Po и концентрацией в почве подвижного фосфора указывает на то, что внесенное в почву фосфорное удобрение является важным источником этих радионуклидов.

Почва является одним из основных источников поступления ^{210}Pb и ^{210}Po в растения, а соответственно, и в рацион животных и человека. По результатам радиохимического анализа растительных образцов и почв, на которых они выращены, определены коэффициенты перехода радионуклидов ^{210}Pb и ^{210}Po из почвы в овощную продукцию в условиях сельскохозяйственного производства. Проведен анализ съедобных частей основных видов сельскохозяйственных культур, таких как картофель, капуста и морковь.

Установлено, что активность ^{210}Pb в пахотном горизонте изученных сельскохозяйственных почв в расчете на единичную площадь варьировала в интервале от 4,3 до 9,2 кБк/м², а ^{210}Po – от 1,3 до 2,7 кБк/м². Удельная активность по ^{210}Pb моркови в сыром виде составила 14,4–23,9 (среднее – 17,8) мБк/кг, картофеля – 10,4–41,2 (среднее – 26,7), капусты – 34,0–48,6 (среднее – 38,8) мБк/кг. Удельная активность по ^{210}Po составила соответственно 10,2–18,9 (среднее – 13,3) мБк/кг, 11,2–35,7

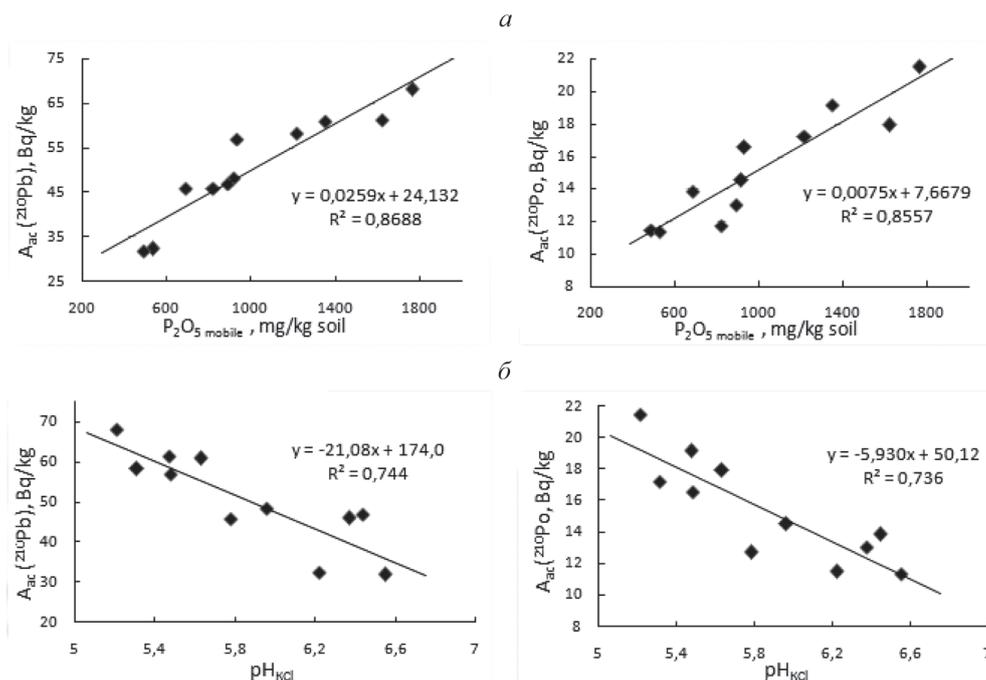


Рис. 3. Изменение удельных активностей по ^{210}Pb и ^{210}Po пахотных горизонтов сельскохозяйственных почв в зависимости от концентрации подвижного фосфора (а) и pH_{KCl} (б)

Fig. 3. The change in the activity concentrations of ^{210}Pb and ^{210}Po in the arable soil horizons depending on the concentration of mobile phosphorus (a) and pH_{KCl} (b)

(среднее – 23,8) и 16,6–28,6 (среднее – 21,3) мБк/кг. Рассчитанные по установленным данным коэффициенты перехода радионуклидов из почвы в растительную продукцию приведены в табл. 3.

Из полученных результатов видно, что по биологической доступности ^{210}Po примерно вдвое превосходит ^{210}Pb , о чем свидетельствуют более высокие коэффициенты перехода ^{210}Po из почвы в растительные образцы. При этом уменьшение кислотности (увеличение pH) почвенной среды способствовало сокращению поступления радионуклидов ^{210}Pb и ^{210}Po в сельскохозяйственные культуры. Коэффициенты перехода радионуклидов в одни и те же виды растительной продукции уменьшались на 3–5 % при увеличении pH почвенной среды от 5,5 до 6,6.

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты перехода ^{210}Pb и ^{210}Po из дерново-подзолистой супесчаной почвы в сельскохозяйственные культуры

Table 3. The transfer factors of ^{210}Pb and ^{210}Po from sod-podsolic loamy-sand soil to the agricultural cultures

Культура (хозяйственно полезная часть растений)	Коэффициент перехода, $\times 10^6 \text{ м}^2/\text{кг}$			
	^{210}Pb		^{210}Po	
	Среднее значение	Диапазон значений	Среднее значение	Диапазон значений
Морковь (корнеплоды)	1,32	0,83–2,26	3,09	1,90–5,33
Картофель (клубни)	2,01	0,45–4,54	4,41	1,56–6,81
Капуста (кочаны)	2,99	1,56–5,33	5,14	2,63–7,45

В соответствии с величиной коэффициентов перехода радионуклидов из почвы в растительную продукцию биологическая доступность ^{210}Pb и ^{210}Po сельскохозяйственным культурам возрастала в ряду морковь – картофель – капуста. Относительно более высокое накопление радионуклидов в съедобных частях капусты по сравнению с картофелем и морковью могло быть связано с более значительным вкладом внекорневого усвоения радионуклидов надземной частью растений в вегетационный период (за счет атмосферных выпадений, оседания частиц почвы после ветрового подъема), а также с интенсивной транслокацией радионуклидов в листостебельную часть растений (кочаны) при корневом поглощении радионуклидов из почвы.

Заклучение. В ходе исследований впервые установлено содержание радионуклидов ^{210}Pb и ^{210}Po в почвах естественных луговых экосистем и пахотных горизонтах почв агроэкосистем юго-восточного региона Беларуси. Выявлено существенное отличие между содержанием радионуклидов в верхнем 0–5-сантиметровом слое органогенного горизонта и нижележащими слоями почв естественных луговых экосистем. Характер распределения ^{210}Pb и ^{210}Po по вертикальным профилям луговых почв позволяет предположить, что поступление радионуклидов в почвенный покров в основном обусловлено аэрозольными выпадениями из атмосферы и их биогенным накоплением в верхней части органогенного горизонта. Показано, что в пахотном горизонте сельскохозяйственных почв, в которые регулярно вносятся минеральные удобрения, содержание ^{210}Pb и ^{210}Po линейно зависит от концентрации подвижного фосфора. Уменьшение кислотности почвенной среды способствует снижению биологической доступности радионуклидов ^{210}Pb и ^{210}Po и их накоплению в растительной продукции. Коэффициенты перехода радионуклидов в одни и те же виды растительной продукции меньше для почв с более высокими показателями pH. В соответствии с установленными коэффициентами перехода радионуклидов в хозяйственно полезные части сельскохозяйственных растений биологическая доступность ^{210}Pb и ^{210}Po увеличивается в ряду морковь – картофель – капуста. При этом по биологической доступности ^{210}Po превосходит ^{210}Pb , о чем свидетельствуют более высокие коэффициенты перехода ^{210}Po в соответствующие сельскохозяйственные культуры.

Список использованных источников

1. The fractionation and determination procedures for the speciation of ^{210}Pb and ^{210}Po in soil samples / G. Jia [et al.] // *Analitica Chimica Acta*. – 2006. – Vol. 562. – P. 51–58.
2. Баранов, В. И. Содержание радиоактивных элементов в некоторых почвах СССР / В. И. Баранов, С. Г. Цейтлин // Докл. АН СССР. – 1941. – Т. 30, № 4. – С. 328–331.
3. Власов, В. К. Пример ситуационного радиологического анализа (инцидент с полонием-210) / В. К. Власов, Т. Б. Петрова, А. М. Афиногенов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. – 2008. – Т. 49, № 4. – С. 274–281.
4. Полониевая версия смерти Ясира Арафата: результаты российских исследований / В. В. Уйба [и др.] // Мед. радиол. и радиац. безопасность. – 2015. – Т. 60, № 3. – С. 50–57.
5. Кулаков, В. М. Ядерные свойства радионуклидов / В. М. Кулаков, А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина // Физические величины: справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 993–1054.
6. Военная токсикология, радиобиология и медицинская защита: учебник для мед. вузов / С. А. Куценко [и др.]; под ред. С. А. Куценко. – СПб.: Фолиант, 2004. – 526 с.
7. Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при осуществлении деятельности по использованию атомной энергии и источников ионизирующего излучения»: утв. Министерством здравоохранения Республики Беларусь 31.12.2013.
8. Поведение радионуклидов урана и радия в природно-растительных комплексах Беларуси вне зоны чернобыльского загрязнения / Г. А. Соколик [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2011. – № 2. – С. 98–104.
9. Поведение радионуклидов урана и радия в почвенно-растительном комплексе агроценозов вне зоны чернобыльского загрязнения Беларуси / Г. А. Соколик [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2013. – № 1. – С. 102–110.
10. Анисова, Ж. М. Природные изотопы урана в почвах и растениях сосновых лесов Минской возвышенности / Ж. М. Анисова, Б. И. Якушев. – Минск: Беларус. навука, 2008. – 162 с.
11. Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследование почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь: метод. указания / И. М. Богдевич [и др.]; ред. И. М. Богдевич. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии Нац. акад. наук Беларусі, 2012. – 46 с.
12. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение pH по методу ЦИНАО: ГОСТ 26483-85. – Введ. 01.07.86 до 01.07.96. – Минск, 1985. – 4 с.
13. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО: ГОСТ 26207-91. – Взамен ГОСТ 26207-84; введ. 01.07.93. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 936 с.
14. Искра, А. А. Естественные радионуклиды в биосфере / А. А. Искра, В. Г. Бахуров. – М.: Энергоиздат, 1981. – 124 с.
15. Сельское хозяйство, ионизирующие излучения и охрана окружающей среды (к 30-летию Всероссийского научно-исследовательского института сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии – ВНИИСХРАЭ) / под ред. Р. М. Алексахина. – Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2002. – 295 с.

References

1. Jia, G., Belli, M., Liu, S., Sansone, U., Xu, Ch., Rosamilia, S., Xiao, X., Gaudino, S., Chen, L., Yang, H. (2006), “The fractionation and determination procedures for the speciation of ^{210}Pb and ^{210}Po in soil samples”, *Analitica Chimica Acta*, vol. 562, pp. 51–58.
2. Baranov, V. I. and Zeitlin, S. G. (1941), “The content of radioactive elements in some soils of the USSR”, *Doklady USSR Academy of Sciences*, vol. 30, no. 4, pp. 328–331.

3. Vlasov, V. K., Petrov, T. B. and Afinogenov, A. M. (2008), “An example of situational radiological analysis (incident with polonium-210)”, *Bulletin of Moscow University. Series. 2. Chemistry*, vol. 49, no. 4, pp. 274–281.
4. Uiba, V. V., Kotenko, K. V., Ilyin, L. A., Kvacheva, Yu. E., Abramov, Yu. V., Galstyan, I. A., Guskova, A. K., Kukhta, B. A., Nadezhina, N. M., Stebelkov, V. A., Tsovyanov, A. G., Shinkarev, S. M. and Iatsenko, V. N. (2015), “Version of polonium death of Yasser Arafat: the results of Russian studies”, *Meditinskaya radiologicheskaya i radiatsionnaya bezopasnost' [Nuclear Medicine and Radiation Safety]*, vol. 60, no. 3, pp. 50–57.
5. Kulakov, V. M., Babich, A. P. and Grandma, N. A. (1991), “The nuclear properties of radionuclides”, in Grigoryev, I., Meilikhov E. Z. (ed.), *Fizicheskie velichiny [Physical quantities]*, Energoatomisdat, Moscow, RU, pp. 993–1054.
6. Kutsenko, S. A., Butomo, N. V., Grebenyuk, N., Ivnitiskii, Y. Y., Melnychuk, V. P., Preobrazhenskaya, T. N., Rybalko, V. M. and Savateev, N. V. (2004), “Military toxicology, radiobiology and medical protection”, in Kutsenko, S. A. (ed.), *Folio*, St. Petersburg, RU.
7. Sanitary norms and rules: requirements for ensuring radiation safety of personnel and the public in carrying out activities on the use of nuclear energy and ionizing radiation sources, approved Ministry of Health of the Republic of Belarus 31.12.2013.
8. Sokolik, G. A., Ovsyannikov, S. V., Voinikov, E. V., Ivanova, T. G. and Popenya, M. V. (2011), “The behavior of radionuclides of uranium and radium in natural plant complexes of Belarus is Chernobyl contamination zone”. *Vesti Natsyonalnoi akademii navuk Belarusi. Seriya himichnyh navuk*, no. 2, pp. 98–104.
9. Sokolik, G. A., Ovsyannikov, S. V., Popenya, M. V. and Ivanova, T. G. (2013), “The behavior of radionuclides of uranium and radium in the soil-plant complex is agrotocenozov Chernobyl contamination zone of Belarus”. *Vesti Natsyonalnoi akademii navuk Belarusi. Seriya himichnyh navuk*, no. 1, pp. 102–110.
10. Anisova, J. M. and Yakushev, B. I. (2008), *Prirodnye izotopy urana v pochvakh i rasteniyakh sosnovykh lesov Minskoi vozvysheynosti [Natural isotopes of uranium in soils and plants of upland pine forests]*, Belarusian science, Minsk, BY.
11. Bogdevich, I. M., Lapa, W. B., Shmigelsky, I. D., Kasyanchik, S. A., Pirogovskaya, G. B., Sandpiper, A. F., Putyatin, Y. V., Tarasyuk, S. V., Petrikevich, O. M., Ageets, V. Y., Averin, V. S., Podoliak, A. G., Kislushko, P. M., Shkut, E. N., Mountain, A. V., Kvetkovskaya, A. V., Antonenko, A. E., Basalaeva, Z. P. and Vasheprudov, V. F. (2012), *Krupnomasshtabnoe agrokhimicheskoe i radiologicheskoe obsledovanie pochv sel'skokhozyaistvennykh zemel' Respubliki Belarus': metod. ukazaniya [Large-scale agrochemical and radiological examination of soils of agricultural lands of the Republic of Belarus: method. instructions]*, in Bogdevich, I. M. (ed.), Institute of Soil Science and Agricultural Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, BY.
12. (1985), *GOST 26483-85: Pochvy. Prigotovlenie solevoy vytjazhki i opredelenie rN po metodu CINA0 [GOST 26483-85: Soils. Preparation of salt extraction and determination of pH by the method CINA0]*, Minsk, BY.
13. (1993), *GOST 26207-91: Pochvy. Opredelenie podviznykh soedinenij fosfora i kalija po metodu Kirsanova v modifikacii CINA0 [GOST 26207-91: Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium for Kirsanova method modification CINA0]*, Izdatel'stvo standartov, Moscow, RU.
14. Iskra, A. A. and Bakhur, V. G. (1981), *Estestvennye radionuklidy v biosfere [Natural radionuclides in the biosphere]*, Energoizdat, Moscow, RU.
15. Alexhin, R. M. (ed.) (2002), *Sel'skoe hozjajstvo, ionizirujushhie izlucheniya i ohrana okruzhajushhej sredy (k 30-letiju Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sel'skhozjajstvennoj radiologii i agrojekologii – VNIISHRAJe) [Agriculture, ionizing radiation and environmental protection (to the 30th anniversary of the All-Russian Research Institute of Agricultural Radiology and Agroecology–RIARAE)]*, RIARAE, Obninsk, RU.

Информация об авторах

Клементьева Екатерина Алексеевна – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: katya-klem@outlook.com

Овсянникова Светлана Васильевна – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: svetlanaosv@mail.ru

Никитин Александр Николаевич – канд. с.-х. наук, заведующий лабораторией. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: nikitinale@gmail.com

Для цитирования

Клементьева, Е. А. Динамика изотопов ^{210}Pb и ^{210}Po в естественных луговых экосистемах и агрофитоценозах с регулярным внесением фосфорных удобрений / Е. А. Клементьева, С. В. Овсянникова, А. Н. Никитин // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2017. – № 1. – С. 39–47.

Information about the authors

Klementjeva Ekaterina Aleksievna – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninskogo Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: katya-klem@outlook.com

Ovsiannikova Svetlana Vasilievna – Ph. D. (Chem.), Leading researcher. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svetlanaosv@mail.ru

Nikitin Aleksandr Nikolayevich – Ph. D. (Agricult.), Head of the laboratory. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninskogo Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: nikitinale@gmail.com

For citation

Klementjeva, E. A., Ovsiannikova, S. V. and Nikitin, N. A. (2017), “Dynamics of isotopes ^{210}Pb and ^{210}Po in natural ecosystems and agrophytocenoses with the regular application of phosphorus fertilizers”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, biological series*, no. 1, pp. 39–47.