

Содержание ^{210}Po и ^{210}Pb в некоторых видах пищевых продуктов. Оптимизация метода определения

М.В. Кадука¹, Л.Н. Басалаева¹, Т.А. Бекашева¹, С.А. Иванов¹, Н.В. Салазкина¹, В.В. Ступина¹, А.Н. Кадука²

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский противотуберкулезный диспансер № 3, Санкт-Петербург, Россия

В статье приведен обзор данных о содержании изотопов полония и свинца (^{210}Po , ^{210}Pb) в природных объектах, полученных из литературных источников. Приведен обзор существующих методов определения содержания ^{210}Po и ^{210}Pb в разных объектах и анализ целесообразности применения описанных в них приемов для определения содержания указанных изотопов в пищевых продуктах в разрабатываемой в радиохимической лаборатории института методике. Предложен более совершенный и простой для реализации исполнителями, чем существующие, метод определения содержания ^{210}Po и ^{210}Pb в пищевых продуктах из объема пробы не более 1,0 кг с минимально измеряемой активностью счетного образца не более 0,01 Бк. Приведены результаты исследования содержания ^{210}Po и ^{210}Pb в некоторых видах пищевых продуктов, отобранных на дачных участках в Ленинградской области и приобретенных в торговой сети г. Санкт-Петербурга. Выполнена оценка потенциальной среднегодовой дозы внутреннего облучения населения (E_{int}) за счет содержания ^{210}Po и ^{210}Pb в исследованных пищевых продуктах, потребляемых местным населением. Для расчета доз внутреннего облучения использовали данные о рационах питания взрослых жителей населенных пунктов городского типа по данным Росстата и интернет-ресурсов. Полученные результаты наглядно показали, что только за счет отдельных природных радионуклидов, причем содержащихся в ограниченном наборе пищевых продуктов (только в тех видах продуктов, которые были исследованы), доза внутреннего облучения населения при потреблении пищевых продуктов может в десятки раз превышать дозу облучения за счет техногенных радионуклидов.

Ключевые слова: природные радионуклиды, изотопы полония и свинца, пищевые продукты, методы определения удельной активности, радиохимический анализ, дозы внутреннего облучения населения.

Введение

Проблемы определения содержания природных радионуклидов в пищевых продуктах

В отдельных случаях вклад в дозу внутреннего облучения за счет содержания природных радионуклидов (ПРН) в пищевых продуктах может быть значительным [1, 2]. Как правило, для оценки доз облучения населения за счет ПРН специалисты, заполняющие форму статистической отчетности (4-ДОЗ), используют среднемировые данные о содержании ПРН в пищевых продуктах, приведенные в отчете НКДАР ООН, 2000 г. [3]. Такая ситуация связана с тем, что в доступных в настоящее время методах определения содержания ПРН в пищевых продуктах обычно используются сложные способы пробоподготовки самого продукта перед анализом, в ходе анализа применяются агрессивные реактивы, предлагаемые приемы радиохимического выделения и концентрирования являются весьма трудоемкими. В результате в формах статисти-

ческой отчетности содержатся сведения не о реальных дозах облучения населения той или иной территории за счет содержания ПРН в пищевых продуктах, а среднемировые данные. При этом значения удельной активности ПРН в одном и том же виде пищевого продукта, по данным отчета НКДАР ООН [3], даже для территории одного государства могут отличаться на несколько порядков величины. Так, например, содержание ^{210}Pb в мясных продуктах, произведенных на территории Великобритании, может варьировать в диапазоне 0,040–3,700 Бк/кг, т.е. различаться в 93 раза, ^{210}Po – в диапазоне 0,062–67 Бк/кг, т.е. различаться в 1100 раз.

Естественная радиоактивность растений и животных обусловлена поглощением ими радиоактивных веществ, которые встречаются в природе. Радиоактивные изотопы свинца и полония, как продукты распада семейств ^{238}U , ^{232}Th и ^{235}U , распространены в окружающей среде повсеместно и представлены относительно долгоживущими ^{210}Pb и ^{210}Po , а также короткоживущими $^{211,212,214}\text{Pb}$

Кадука Марина Валерьевна

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: kaduka@mail.ru

и $^{212,214,215,216,218}\text{Po}$. При этом ^{210}Pb и его дочерний продукт ^{210}Po по радиотоксическому действию на организм отнесены к группе радионуклидов с особо высокой токсичностью [4].

Содержание полония и свинца в пищевых продуктах

Основными источниками ^{210}Po и ^{210}Pb в природных объектах являются естественный радиогеохимический фон, участки локального концентрирования в результате интенсивных радоновых потоков, урановые месторождения, техногенное загрязнение окружающей природной среды. Наиболее мощным источником в естественных условиях являются урановые руды.

Высокая удельная активность ^{210}Po и ^{210}Pb характерна для некоторых видов растений, особенно в северных регионах (мхи, лишайники). Северные районы отличаются также повышенным содержанием ^{210}Po в организме человека и животных, примерно в 10 раз выше, чем в южных регионах [5].

Поступление ^{210}Po и ^{210}Pb в растения связано с несколькими неравнозначными источниками: непосредственным отложением изотопов на поверхностные части растений с атмосферными выпадениями; корневым поступлением этих изотопов из почвы; накоплением ^{210}Po и ^{210}Pb при распаде материнских радионуклидов, поступивших из почвы. Преобладает накопление из атмосферного источника, на долю корневого поступления приходится до 20% ^{210}Po и до 14% – ^{210}Pb [6]. ^{210}Pb накапливается преимущественно в наземных частях растений, главным образом в верхних, молодых. ^{210}Po также концентрируется в наземной части, но в нижней, более старой части растений. В корневой системе полония и свинца существенно меньше.

Различающееся содержание изотопов полония и свинца в продуктах растительного происхождения обусловлено разной сорбционной поверхностью растений. Особенно высокое содержание свинца и полония обнаружено в чае – до 30,5 Бк/кг. Содержание ^{210}Pb и ^{210}Po в продуктах питания растительного происхождения зависит от места их произрастания, а также от времени, прошедшего с момента сбора урожая [6]. Содержание ^{210}Po и ^{210}Pb в хлебных злаках неодинаково. Поскольку плотность выпадений ^{210}Pb из атмосферы и вегетационные периоды этих растений примерно одинаковы, можно объяснить различия, например, большей сорбционной поверхностью колосьев овса по сравнению с пшеницей и рожью. Особенно высокое количество полония и свинца обнаружено в чае и кофе. Высокая удельная активность изотопов полония и свинца в чае может быть объяснена большой сорбционной поверхностью его листьев. Зернами кофе эти нуклиды могли быть накоплены только метаболическим путем, так как кофе относится к вечнозеленым растениям, и его зерна, закрытые в плоде, защищены от поверхностного загрязнения. ^{210}Pb и ^{210}Po в корнеплодах распределены неравномерно. Большой процент активности сосредоточен в съедобной части корнеплодов. Так, в клубнях картофеля содержится 73% ^{210}Pb и 61% – ^{210}Po от общего содержания данных радионуклидов в растении. В клубнях свеклы содержится 41% ^{210}Pb и 39% – ^{210}Po от общего содержания радионуклидов в растении [6].

В молоке удельная активность свинца колеблется в пределах 0,18–13,7 Бк/л. Содержание полония в молоке

достигает 3,3 Бк/кг, в говядине – 130 Бк/кг. В среднем в суточном рационе жителя средних широт России содержится около 0,22 Бк ^{210}Po , при отношении $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$, равном 0,73 [7].

Обзор методик определения содержания полония и свинца в разных объектах

Физические характеристики ^{210}Pb и ^{210}Po предоставляют широкие возможности детектирования данных радионуклидов в биопробах любой экологической цепочки. При этом используются радиометрические и спектрометрические измерения по альфа-, бета- или гамма-излучению после радиохимического выделения. [6]. Специфическим носителем при изучении поведения микроколичеств полония является теллур. Однако следует учитывать, что в наибольшей степени аналогия в химическом поведении этих двух элементов проявляется в случае ковалентных соединений (оксиданионы, элементарорганические соединения и др.). Более основной характер полония по сравнению с теллуром определяет некоторое различие в поведении их ионных форм. Особенно это сказывается в склонности полония к комплексообразованию со многими лигандами, для которых комплексообразование с теллуром нехарактерно. В этом отношении полоний занимает промежуточное положение между теллуром и висмутом, и часто отделить полоний от висмута труднее, чем от теллура [8].

Самый распространенный, простой в исполнении, чувствительный и точный метод количественного определения активности полония в неводных пробах – альфа-спектрометрический метод. Перед радиохимической подготовкой в пробу вводится фиксированное количество изотопного индикатора ^{208}Po или ^{209}Po . Идентификация и расчет активностей выполняются по соотношению интенсивностей альфа-счета ^{210}Po и добавленной метки в соответствующих энергетических областях. Приготовление препарата для измерения заключается в нанесении активности полония на подложку из металла Ni, Cu, Ag (спонтанное осаждение). Данный метод является довольно длительным, так как для определения ^{210}Pb необходимо проводить повторное осаждение через 6 месяцев [4]. Метод Черенковского излучения используется для анализа ^{210}Pb по β -излучению ^{210}Bi , однако этот вариант требует длительного времени установления равновесия с материнским ^{210}Pb (около 30 дней) и характеризуется сравнительно низкой эффективностью регистрации (14–20%). Кроме специальных счетчиков, черенковское излучение измеряют также с помощью жидкостно-сцинтилляционной аппаратуры. Активность ^{210}Pb , выделенного из пробы на каком-либо носителе, также может быть измерена с применением гамма-спектрометра [4].

Жидкостной сцинтилляционный метод (ЖС) характеризуется высокой эффективностью регистрации бета-излучения, в том числе низкоэнергетического. ЖС-техника позволяет измерять непосредственно ^{210}Pb , исключая стадию выжидания накопления дочерних радионуклидов. Кроме того, возможно одновременное определение ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{210}Bi . Методика достаточно сложная, предусматривает предварительную очистку от железа и последующее разделение на отдельные фракции радионуклидов на колонке со смолой Eichrom Srresin. При этом необходимо периодически выделять трассер ^{212}Pb , поскольку это

короткоживущий изотоп с периодом полураспада 10,6 ч. Кроме того, выход ^{210}Pb , ^{210}Bi рассчитывают по гамма-излучающим трассерам после дополнительного измерения препаратов на гамма-спектрометре. Продолжительность анализа пробы при применении данного метода составляет 10 дней [4].

Метод радиометрического определения активности ^{210}Po и ^{210}Pb широко используется для определения анализа проб как водных, так и неводных объектов [4, 9, 10]. Это связано с доступностью измерительных установок и простотой их обслуживания.

Наиболее распространенным способом радиохимического выделения ^{210}Pb (^{210}Bi) и ^{210}Po из раствора является метод их электрохимического (бестокового) осаждения на металлические диски (мишени), изготовленные из серебра, никеля, меди или стали. При этом на последних трех металлах одновременно с полонием количественно осаждается висмут, что делает возможность по бета-активности ^{210}Bi определять активность ^{210}Pb (при условии их равновесия). Металлический диск после спонтанного осаждения на нем ^{210}Po и ^{210}Bi является счетным образцом для альфа-бета-радиометрических измерений [4, 9, 10].

Время спонтанного осаждения ^{210}Po и ^{210}Bi на дисках в разных методиках варьирует от 1 до 18 ч. В источнике [9] описано осаждение ^{210}Po и ^{210}Bi в течение 2 ч при интенсивном кипении раствора. Оптимальные условия, обеспечивающие химический выход ^{210}Po не менее 90%, согласно источнику [11], следующие: 0,1 н HCl; T = 85 °C; $t_{\text{ос}} = 3$ ч.

Метод определения свинца в пищевых продуктах, предложенный в источнике [12], не позволяет одновременно проводить определение удельной активности ^{210}Po и ^{210}Pb из одной пробы, так как по методике проводится озоление продуктов при 400–500 °C, что приводит к потере полония в анализируемых пробах.

Цель исследования – разработка оптимального метода определения содержания ПРН в пищевых продуктах с последующей оценкой их содержания в различных видах (группах) продуктов.

Задачи исследования

1. Оптимизировать существующие в настоящее время приемы радиохимического выделения ^{210}Pb и ^{210}Po из различных видов пищевых продуктов,
2. Получить первичные данные о содержании ^{210}Pb и ^{210}Po в выборочной группе пищевых продуктов, в которой, по литературным данным, ожидается повышенное содержание указанных изотопов.
3. Получить оценочные значения потенциальной дозы внутреннего облучения населения за счет проанализированных продуктов.

Материалы и методы

Принимая за основу методику определения ^{210}Po и ^{210}Pb в воде, разработанную в Санкт-Петербургском институте радиационной гигиены¹ [10], и учитывая спец-

ифику подготовки пищевых продуктов для анализа и некоторые приемы радиохимического анализа, описанные другими исследователями [4–6, 12], предлагается следующая принципиальная схема определения ^{210}Po и ^{210}Pb в пищевых продуктах.

Подготовка проб

Перед анализом все твердые образцы (20–1000 г в зависимости от предполагаемой активности радионуклидов) проходят обычную подготовку, как перед кулинарной обработкой и употреблением в пищу: снятие кожуры, удаление косточек (при наличии) и тщательную промывку водой. Подготовленные образцы высушивают до постоянного веса. Жидкие пробы (молоко) концентрируют выпариванием с добавлением азотной кислоты до минимального объема.

Озоление

Анализ на содержание полония осложняется летучестью его соединений, особенно органических. Поэтому при определении полония рекомендуется использовать только «мокрое» озоление. При этом необходимо ограничивать температуру окончательного выпаривания досуха с HNO_3 и HCl до 120–150 °C.

Для проведения анализа берут навеску не менее 20 г подготовленной пробы. Пробу помещают в стакан емкостью 600–800 мл и заливают 100 мл концентрированной азотной кислоты HNO_3 . Приливают кислоту следуют небольшими порциями, чтобы избежать избыточного пенообразования. Целесообразно оставить пробу, залитую концентрированной кислотой HNO_3 , на ночь. Затем продолжают «мокрое» озоление при нагревании до 120–150 °C. Далее раствор упаривают до минимального объема, снова приливают 50 мл концентрированной HNO_3 . Процесс повторяют несколько раз до полного сжигания органики. Затем к пробе, помимо концентрированной азотной кислоты, добавляют всего по каплям 4–8 мл перекиси водорода (H_2O_2 – 35% раствор) через каждые 10–15 минут и продолжают процесс окисления, следя за тем, чтобы он проходил спокойно. Процесс проводят до тех пор, пока не получают осветленный раствор, после чего его выпаривают до влажных солей.

Полученные нитраты переводят в хлориды, для этого к влажным солям небольшими порциями приливают около 50 мл концентрированной соляной кислоты (HCl) и вновь упаривают получаемый раствор до минимального объема. Описанный процесс повторяют 3–4 раза до исчезновения бурых паров окислов азота.

Приготовление раствора для электролитического осаждения

Последнюю порцию упаренного до минимального объема солянокислого раствора пробы выпаривают до сухих солей, избегая их пригорания. По окончании выпаривания в стакан приливают 75 мл 1 н HCl и кипятят несколько минут. Полученный раствор фильтруют через фильтр «синяя лента». Фильтрат доводят дистиллирован-

¹ Методические рекомендации МР 2.6.1.0064-12 «Радиационный контроль питьевой воды методами радиохимического анализа». 63 с. [Methodical Recommendations MR 2.6.1.0064-12 «Radiation control of the drinking water using radiochemical analysis methodic». Moscow, Rosпотребнадзор. 63 p. (In Russ.)]

ной водой до объема 100 мл. При определении полония следует принимать меры для предотвращения его сорбции на стекле; растворы должны быть приблизительно 1 н по соляной кислоте и не ниже 2% по лимонной. Кроме того, осаждению полония на никелевый диск мешает ион трехвалентного железа, если количество его в электролите превышает 10 мг. Для восстановления трехвалентного железа в двухвалентное в раствор пробы добавляют 500–700 мг сухой лимонной кислоты и перемешивают его до полного растворения добавленного сухого реактива. Затем в полученный раствор добавляют сухую аскорбиновую кислоту до его обесцвечивания.

Бестоковое электрохимическое осаждение ^{210}Po и ^{210}Pb

Осаждение ^{210}Po и ^{210}Pb (для определения активности ^{210}Pb) проводят на металлические диски (мишени), изготовленные из никеля. Используемые диски перед повторным применением в зависимости от активности либо кипятят в 0,5 н (10%) растворе HNO_3 до появления зеленоватого цвета в растворе, либо замачивают на некоторое время в азотной кислоте той же нормальности, затем высушивают и полируют мелкой наждачной бумагой. Отполированные диски промывают водой с мылом, высушивают и протирают спиртом или ацетоном для обезжиривания. Диски устанавливают в специальные тефлоновые ячейки, которые помещают на дно стакана, затем заливают подготовленным обесцвеченным раствором пробы для электрохимического осаждения. Стакан накрывают часовым стеклом. Содержимое стакана нагревают на кипящей водяной бане (90 °С) в течение 5–6 ч, периодически перемешивая раствор. Объем жидкости должен быть равным 100 мл в течение всего времени осаждения, поэтому необходимо добавлять к пробе дистиллированную воду по мере испарения раствора. Осаждение полония в значительной мере зависит от условий проведения процесса, поэтому все требования должны строго соблюдаться. После окончания осаждения диск извлекают из электролизера, промывают водой и спиртом. Подготовленный описанным способом диск является счетным образцом для альфа-бета-радиометрических измерений. После электролитического осаждения ^{210}Po и ^{210}Pb на никелевый диск определяют скорость счета полученного образца по α - и β -каналу малофоновой ра-

диометрической установки. Проведение измерений счетного образца и определение удельной активности ^{210}Po и ^{210}Pb проводят согласно общим требованиям п. 13.5 методических рекомендаций¹.

Результаты и обсуждение

В рамках разработки метода определения содержания ^{210}Po и ^{210}Pb в пищевых продуктах в радиохимической лаборатории института в 2019 г. выполнили исследования 23 проб пищевых продуктов, отобранных на дачных участках в Ленинградской области и приобретенных в магазинах торговой сети г. Санкт-Петербурга.

В результате проведенных исследований, теоретических и практических изысканий разработан проект более совершенного и простого для практического исполнения метода определения содержания изотопов полония и свинца в пищевых продуктах из объема пробы не более 1,0 кг, с минимально измеряемой активностью счетного образца не более 0,01 Бк. Метод является более оптимальным, по сравнению с существующими, поскольку используемые в нем приемы радиохимического выделения и концентрирования позволяют определять удельную активность полония и свинца из меньшего объема пробы с минимальным использованием в ходе анализа агрессивных веществ, с минимально возможным временем проведения радиохимических процессов и временем проведения измерений счетного образца. Кроме того, метод является достаточно простым в исполнении оператором.

Удельную активность природных изотопов ^{210}Po и ^{210}Pb определили в 3 пробах салатной зелени, 6 пробах пряных трав, 1 пробе шпинатной зелени, отобранных на дачных участках в Ленинградской области. Содержание указанных радионуклидов также определили в 1 пробе чая, 1 пробе кофе, 2 пробах злаков (в хлопьях), 2 пробах хлеба, 2 пробах молока, 4 пробах картофеля и 1 пробе яблок, приобретенных в торговой сети г. Санкт-Петербурга. Данные о содержании ^{210}Po и ^{210}Pb в исследованных пробах приведены в таблице 1.

Средние значения удельной активности ^{210}Po и ^{210}Pb и диапазоны данных показателей в пробах проанализированных продуктов, отобранных на дачных участках в Ленинградской области и приобретенных в торговой сети г. Санкт-Петербурга, приведены в таблице 2.

Таблица 1

Удельная активность ^{210}Po и ^{210}Pb в пробах пищевых продуктов, Бк/кг

[Table 1

Specific activity of ^{210}Po and ^{210}Pb in the samples of the foodstuffs, Bq/kg]

| № п/п | Вид продукта [Type of product] | Место отбора [Place of sampling] | Удельная активность, Бк/кг [Specific activity, Bq/kg] | |
|-------|---------------------------------|----------------------------------|---|-------------------|
| | | | ^{210}Po | ^{210}Pb |
| 1 | Салат «Азарт» [Lettuce "Ardor"] | дп Дивенская [st. Divenskaya] | 0,11±0,02 | 0,28±0,06 |
| 2 | Салат листовой [Leaf lettuce] | дп Дивенская [st. Divenskaya] | 0,08±0,02 | 0,32±0,06 |
| 3 | Кресс-салат [Watercress] | дп Дивенская [st. Divenskaya] | 0,26±0,05 | 0,44±0,09 |
| 4 | Петрушка [Parsley] | дп Дивенская [st. Divenskaya] | 0,04±0,01 | 0,11±0,02 |
| 5 | Кинза [Cilantro] | дп Дивенская [st. Divenskaya] | 0,15±0,05 | 0,30±0,15 |

Окончание таблицы 1

| N п/п | Вид продукта [Type of product] | Место отбора [Place of sampling] | Удельная активность, Бк/кг [Specific activity, Bq/kg] | |
|-------|--|----------------------------------|---|-------------------|
| | | | ²¹⁰ Po | ²¹⁰ Pb |
| 6 | Кинза [Cilantro] | гп Заневское [st. Zanevskoye] | 0,19±0,04 | 0,37±0,07 |
| 7 | Горчица [Mustard] | гп Заневское [st. Zanevskoye] | 0,15±0,03 | 0,43±0,09 |
| 8 | Руккола [Erica sativa] | пгт Синявино [st. Sinjavino] | 0,21±0,04 | 0,41±0,08 |
| 9 | Укроп [Dill] | пгт Синявино [st. Sinjavino] | 0,09±0,02 | 0,21±0,04 |
| 10 | Шпинат [Spinach] | дп Дивенская [st. Divenskaya] | 0,19±0,04 | 0,41±0,08 |
| 11 | Чай «Гринфилд» черный [Black tea "Greenfield"] | Торговая сеть [Trade network] | 1,33±0,27 | 1,41±0,28 |
| 12 | Кофе «Чибо эксклюзив», гранулы [Coffee "Chibo exclusive" granules] | Торговая сеть [Trade network] | 0,19±0,04 | 1,11±0,22 |
| 13 | Геркулес «Ясно солнышко», хлопья [Oat-flakes "Shine Sun", flakes] | Торговая сеть [Trade network] | 0,056±0,011 | 0,24±0,05 |
| 14 | Злаки из овса, пшеницы, ячменя и ржи, хлопья [Cereals from oat, wheat and rye, flakes] | Торговая сеть [Trade network] | 0,25±0,05 | 0,28±0,06 |
| 15 | Хлеб ржаной [Rye bread] | Торговая сеть [Trade network] | 0,08±0,04 | 0,18±0,09 |
| 16 | Хлеб «Дарницкий» [Bread "Darnnitsky"] | Торговая сеть [Trade network] | 0,22±0,09 | 0,62±0,31 |
| 17 | Молоко «Пискаревское» [Milk "Piskarevskoe"] | Торговая сеть [Trade network] | 0,010±0,005 | 0,016±0,008 |
| 18 | Молоко «Пискаревское» [Milk "Piskarevskoe"] | Торговая сеть [Trade network] | 0,012±0,006 | 0,026±0,013 |
| 19 | Картофель [Potatoes] | Торговая сеть [Trade network] | 0,012±0,004 | 0,074±0,037 |
| 20 | Картофель [Potatoes] | Торговая сеть [Trade network] | 0,012±0,005 | 0,054±0,027 |
| 21 | Картофель из Беларуси [Potatoes from Belorussia] | Торговая сеть [Trade network] | 0,013±0,005 | 0,058±0,029 |
| 22 | Картофель белый [Potatoes white] | Торговая сеть [Trade network] | 0,026±0,013 | 0,08±0,04 |
| 23 | Яблоко [Apple] | Торговая сеть [Trade network] | 0,024±0,007 | 0,062±0,019 |

Таблица 2

Средние значения и диапазоны значений удельной активности ²¹⁰Po и ²¹⁰Pb в пробах пищевых продуктов, Бк/кг

[Table 2]

The average values and diapasons of ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb in the samples of the foodstuffs, Bq/kg

| Вид продукта [Type of product] | Число проб [Number of samples] | Удельная активность ²¹⁰ Po, Бк/кг [210Po specific activity, Bq/kg] | | Удельная активность ²¹⁰ Pb, Бк/кг [210Pb specific activity, Bq/kg] | |
|--|--------------------------------|---|---------------------|---|---------------------|
| | | Среднее [Average] | Диапазон [Diapason] | Среднее [Average] | Диапазон [Diapason] |
| | | | | | |
| Пряные травы [Spicy herbs] | 6 | 0,138 | 0,04–0,21 | 0,31 | 0,11–0,43 |
| Шпинатная зелень [Spinach greenery] | 1 | 0,19 | – | 0,41 | – |
| Чай черный [Black tea] | 1 | 1,33 | – | 1,41 | – |
| Кофе гранулированный [Granulated coffee] | 1 | 0,19 | – | 1,11 | – |

| Вид продукта [Type of product] | Число проб [Number of samples] | Удельная активность ²¹⁰ Po, Бк/кг [²¹⁰ Po specific activity, Bq/kg] | | Удельная активность ²¹⁰ Pb, Бк/кг [²¹⁰ Pb specific activity, Bq/kg] | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--|---------------------|--|---------------------|
| | | Среднее [Average] | Диапазон [Diapason] | Среднее [Average] | Диапазон [Diapason] |
| | | | | | |
| Хлеб [Bread] | 2 | 0,15 | 0,08–0,22 | 0,40 | 0,18–0,62 |
| Молоко [Milk] | 2 | 0,011 | 0,010–0,012 | 0,021 | 0,016–0,026 |
| Картофель [Potatoes] | 4 | 0,016 | 0,012–0,026 | 0,067 | 0,054–0,080 |
| Яблоки [Apples] | 1 | 0,024 | – | 0062 | – |

На основании полученных данных о содержании ²¹⁰Po и ²¹⁰Pb в проанализированных пищевых продуктах выполнили оценку потенциальной среднегодовой дозы внутреннего облучения населения (E_{int}) за счет их содержания в некоторых видах продуктов, потребляемых местным населением, а именно: в молоке, картофеле, хлебе, злаках (в хлопьях), чае и кофе. Для расчета доз внутреннего облучения использовали данные о рационах питания взрослого городского населения по доступным данным Росстата за 2018 г. [13]. Данные по потреблению чая и кофе были получены из интернет-ресурсов [14, 15]. Данных по потреблению зелени и пряных трав жителями Российской Федерации найти не удалось, поэтому выполнить оценку доз облучения за счет содержания ²¹⁰Po и ²¹⁰Pb в указанных продуктах на данном этапе исследований оказалось невозможным. При этом, как показали результаты исследований, содержание ²¹⁰Po и ²¹⁰Pb в зелени и пряных травах, выращиваемых на

дачных участках в Ленинградской области, в среднем на порядок выше, чем в хлебе, молоке и картофеле, продающихся в торговой сети г. Санкт-Петербурга. Дозовые коэффициенты для перорального поступления изотопов полония и свинца в организм взрослого населения приведены в Приложении 2а к НРБ-99/2009² – 0,0012 мЗв/Бк для ²¹⁰Po и 0,00069 мЗв/Бк для ²¹⁰Pb.

При расчете потенциальной среднегодовой дозы внутреннего облучения населения (E_{int}) за счет содержания ²¹⁰Po и ²¹⁰Pb в основных пищевых продуктах, потребляемых местным населением, использовали средние значения удельной активности изотопов полония и свинца – $A(^{210}\text{Po})$ и $A(^{210}\text{Pb})$, полученные в результате проведенного исследования без учета неопределенности измерений. Полученные оценочные значения потенциальных доз облучения населения за счет природных изотопов полония и свинца, содержащихся в пищевых продуктах, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Оценочные значения доз внутреннего облучения взрослых жителей за счет содержания природных изотопов плутония и свинца в пищевых продуктах: $E_{int}(^{210}\text{Po})$, $E_{int}(^{210}\text{Pb})$, мЗв/год

[Table 3

Estimation values of internal exposure doses for adult inhabitants due to polonium and lead m natural isotopes in the foodstuffs: $E_{int}(^{210}\text{Po})$, $E_{int}(^{210}\text{Pb})$, mSv/year]

| Вид продукта [Type of product] | Потребление, кг/год [Consumption, kg/year] | $A(^{210}\text{Po})$, Бк/кг [$A(^{210}\text{Po})$, Bq/kg] | $E_{int}(^{210}\text{Po})$, мЗв/год [$E_{int}(^{210}\text{Po})$, mSv/year] | $A(^{210}\text{Pb})$, Бк/кг [$A(^{210}\text{Pb})$, Bq/kg] | $E_{int}(^{210}\text{Pb})$, мЗв/год [$E_{int}(^{210}\text{Pb})$, mSv/year] |
|--|--|---|--|---|--|
| Хлеб ржаной и прочий [Bread rye and other] | 14,1 | 0,15 | 0,00254 | 0,40 | 0,00389 |
| Молоко [Milk] | 45,1 | 0,011 | 0,00060 | 0,021 | 0,00065 |
| Картофель [Potatoes] | 55,9 | 0,016 | 0,00107 | 0,067 | 0,00258 |
| Злаки в хлопьях [Cereal flakes] | 14,2 | 0,153 | 0,00261 | 0,26 | 0,00255 |
| Чай черный [Black tea] | 1,16 | 1,33 | 0,00185 | 1,41 | 0,00113 |
| Кофе гранулы [Granulated coffee] | 1,69 | 0,19 | 0,00039 | 1,11 | 0,00129 |
| E_{int} суммарная по всем продуктам [E_{int} sum for all foodstuffs] | | | 0,0091 | | 0,0121 |

² СанПин 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009 [Sanitary Rules and Norms 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standard NRB-99/2009"]

В результате проведенных расчетов получили оценочное значение дозы внутреннего облучения: $E_{int} (^{210}\text{Po}+^{210}\text{Pb}) = 0,0212$ мЗв/год. Следует отметить, что вышеприведенное значение дозы внутреннего облучения является лишь частью дозы облучения от ПРН в пищевых продуктах, а именно дозой за счет содержания в продуктах только двух радионуклидов и только в шести видах пищевых продуктов. В результате ранее проведенных исследований [16] было получено оценочное значение дозы внутреннего облучения населения жителей Рязанской и Пензенской областей за счет содержания природных изотопов радия в пяти видах пищевых продуктов: $E_{int} (^{226}\text{Ra}+^{228}\text{Ra}) = 0,109$ мЗв/год. При этом значение дозы внутреннего облучения жителей Рязанской и Пензенской областей за счет содержания техногенного ^{137}Cs в основных дозообразующих пищевых продуктах – компонентах рациона питания, полученное в рамках Федеральных целевых программ Роспотребнадзора, составило 0,009 мЗв/год, т.е. существенно меньшую величину. Вклад ^{90}Sr в дозу внутреннего облучения в отдаленный период после аварии на ЧАЭС составляет доли процентов [17], поэтому в расчет не принимался.

Заключение

Естественная радиоактивность растений и животных обусловлена поглощением ими радиоактивных веществ, которые встречаются в природе. Основными дозообразующими радионуклидами, наряду с изотопами урана (^{238}U и ^{234}U), являются изотопы радия (^{226}Ra , ^{228}Ra и ^{224}Ra). ^{226}Ra имеет высокий индекс токсичности, связанный с долговременным отложением в костной ткани, высокими энергиями альфа- и бета-излучения самого ^{226}Ra и его дочерних продуктов распада. ^{210}Po и ^{210}Pb являются наиболее биологически опасными из всей группы природных радионуклидов.

Несмотря на то, что в нашей стране ведется сбор данных в статистических формах отчетности (4-ДОЗ), данных о содержании ПРН в пищевых продуктах, потребляемых населением, недостаточно. Данный факт связан со сложностью определения удельной активности ПРН в пищевых продуктах, так как для этого используются радиохимические методы анализа, являющиеся достаточно трудоемкими, требующими специальной подготовки исполнителей анализа.

Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) в 2017 г. инициировало проект по оценке доз внутреннего облучения за счет поступления природных радионуклидов с пищей и питьевой водой. Был поднят вопрос о необходимости совершенствования существующих методов определения ПРН в пищевых продуктах и сборе информации о содержании ПРН в пищевых продуктах территорий стран – участниц МАГАТЭ. Это говорит об актуальности данного вопроса не только в масштабах Российской Федерации [13].

В результате проведенных исследований, теоретических и практических изысканий в 2018 г. был разработан проект оптимизированного метода определения содержания изотопов радия (^{228}Ra , ^{226}Ra) в пищевых продуктах из объема пробы не более 1 кг, с минимально измеряемой активностью счетного образца не более 0,05 Бк [13]. В 2019 г. разработан проект более совершенного и

простого для реализации исполнителями, чем существующие, метода определения содержания ^{210}Po и ^{210}Pb в пищевых продуктах из объема пробы не более 1 кг с минимально измеряемой активностью счетного образца не более 0,01 Бк.

На основании полученных данных о содержании изотопов радия в проанализированных пищевых продуктах выполнена оценка среднегодовой дозы внутреннего облучения населения Рязанской и Пензенской областей за счет содержания изотопов радия в пяти видах основных дозообразующих продуктов [13] и жителей г. Санкт-Петербурга за счет содержания изотопов полония и свинца в шести видах пищевых продуктов. Полученные результаты наглядно показали, что только за счет отдельных природных радионуклидов, причем содержащихся в ограниченном наборе пищевых продуктов (только в тех видах продуктов, которые были исследованы), доза внутреннего облучения населения при потреблении пищевых продуктов может в десятки раз превышать дозу облучения за счет техногенных радионуклидов.

Литература

1. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 2. Характеристика источников и доз облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 18-35.
2. Историк О.А., Еремина Л.А., Барковский А.Н. и др. Облучение населения Ленинградской области за счет природных источников ионизирующего излучения // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 91-97.
3. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly, VI: Sources. UN, NY, 2000. 654 p.
4. Бахур А.Е., Мануилова Л.И., Овсянникова Т.М. Po-210 и Pb-210 в объектах окружающей среды. Методы определения // АНРИ. 2009. № 1(56). С. 29-40.
5. Искра А.А., Бахуров В.Г. Естественные радионуклиды в биосфере. М.: Энергоиздат, 1981. 124 с.
6. Ермолаева-Маковская А.П., Литвер Б.Я. Свинец-210 и полоний-210 в биосфере. М.: Атомиздат, 1978. 160 с.
7. Ильин Л.А., Коренков И.П., Наркевич Б.Я. Учебник Радиационная гигиена. 5-е изд. М.: изд-во «ГЭОТАР-Медиа», 2017. 413 с.
8. Бреслер С.Е. Радиоактивные элементы. М., Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952. С. 224-228.
9. Шарафутдинова А.Ф. Многофункциональные измерения в организме животных под воздействием эраконда и крещизина. Диссертация на соискание ученой степени кандидата ветеринарных наук. М., 2011. 141 с.
10. Методика выполнения измерений удельной активности радионуклидов ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{228}Th , ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{90}Sr и суммарной удельной активности альфа-, бета-излучающих радионуклидов в воде с применением альфа-бета радиометра и альфа-спектрометра. Свидетельство ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» Федерального государственного агентства по техническому регулированию и метрологии № 1212/07 от 26 октября 2007 г. 42 с.
11. Flynn W.W. The determination of low levels of polonium-210 in the environmental materials // Anal. Chem. Acta. 1968. № 43. P. 221.

12. Методические указания. МУК 4.3.2502-09 Свинец 210. Определение удельной активности пищевых продуктах. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 27 с.
13. Федеральная служба государственной статистики. Потребление продуктов питания в домашних хозяйствах в 2018 году: https://www.gks.ru/bgd/regl/b19_101/Main.htm (Дата обращения 07.04.2020)
14. Известия. Графика. Потребление чая и кофе в России: <https://iz.ru/625034/video/grafika-potreblenie-kofe-i-chaia-v-rossii> (Дата обращения 08.04.2020)
15. Экспертно-аналитический центр агробизнеса “АБ-Центр”. Рынок чая России в 2001-2016 гг.: <https://ab-centre.ru/news/rynok-chaya-rossii-v-2001-2016-gg> (Дата обращения 08.04.2020)
16. Кадука М.В., Басалаева Л.Н., Бекашева Т.А. и др. Содержание изотопов радия в основных дозообразующих продуктах, на территориях, загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС. Оптимизация метода определения // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. 2019. № 2 (22). С. 36–43.
17. Шутов В.Н, Кадука М.В., Брук Г.Я., и др. Динамика радиоактивного загрязнения пищевых продуктов сельскохозяйственного производства и природного происхождения после аварии на чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2008. Т.1, № 3. С. 25-30.

Поступила: 15.04.2020 г.

Кадука Марина Валерьевна – заведующая радиохимической лабораторией Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, дом 8; E-mail: kaduka@mail.ru

Басалаева Лариса Николаевна – старший научный сотрудник радиохимической лаборатории Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Бекашева Тамара Анатольевна – ведущий инженер-исследователь радиохимической лаборатории Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Иванов Сергей Анатольевич – младший научный сотрудник радиохимической лаборатории Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Салазкина Нина Викторовна – ведущий инженер-исследователь радиохимической лаборатории Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Ступина Вероника Вячеславовна – ведущий инженер-исследователь радиохимической лаборатории Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Кадука Александра Николаевна – врач-фтизиатр участковый Санкт-Петербургского противотуберкулезного диспансера № 3, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Кадука М.В., Басалаева Л.Н., Бекашева Т.А., Иванов С.А., Салазкина Н.В., Ступина В.В., Кадука А.Н. Содержание ^{210}Po и ^{210}Pb в некоторых видах пищевых продуктов. Оптимизация метода определения // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 65-74. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-65-74

^{210}Po and ^{210}Pb content in the certain types of foodstuffs. Optimization of the analytical method

Marina V. Kaduka¹, Larisa N. Basalaeva¹, Tamara A. Bekyasheva¹, Sergey A. Ivanov¹, Nina V. Salazkina¹, Veronika V. Stupina¹, Aleksandra N. Kaduka²

¹Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg Tuberculosis Treatment Center №3, Saint-Petersburg, Russia

An article contains the review of the data on the content of polonium and lead content: ^{210}Po , ^{210}Pb in natural entities, obtained from literary sources. The review is given of the existing methods for ^{210}Po and ^{210}Pb content investigation in different entities as well as the analysis of the expedience of the applying of the given polonium and lead content investigation in the foodstuffs technique for the use in a method under development of the radiochemical laboratory of the Institute. More perfect and simple for realization than existing method is given for ^{210}Po and ^{210}Pb content investigation in the foodstuffs from a sample with not more than 1.0 kg weight with minimal detectable activity not more than 0.01 Bq. The results are given of the investigation of ^{210}Po and ^{210}Pb content in the certain types of the foodstuffs sampled in the kitchen gardens located in Leningrad region and bought in the trade network of Saint-Petersburg. Estimation of potential average annual population internal exposure dose (E_{int}) is carried out due to ^{210}Po and ^{210}Pb content in the investigated foodstuffs which are consumed by the local population. For the estimation of the internal exposure doses we used the data on the food rations of adult population of the settlement of the city type according to the data of Rosstat and Internet-resources. It is demonstrated that population internal exposure dose even from several natural radionuclides taking into account consumption of a limited set of foodstuffs could exceed the exposure dose from artificial radionuclide in tens times even for the territories radioactively contaminated after the Chernobyl NPP accident.

Key words: natural radionuclides, polonium and lead isotopes, foodstuffs, methods for specific activity investigation, radiochemical analysis, population internal exposure dose.

References

1. Onishchenko GG, Popova AY, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation Report 2: Characteristics of the sources and exposure doses of the population of the RF. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 18-35 (In Russian).
2. Istorik OA, Eremina LA, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Akhmatdinov RR. Exposure of the public of the Leningrad region due to the natural sources of ionizing. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 91-97 (In Russian).
3. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly, VI: Sources. UN, NY, 2000. 654 p.
4. Bakhur AE, Manuilova LI, Ovsyannikova TM. Po-210 and Pb-210 in the objects of environment/ Methods of obtaining. *ANRI*. 2009;1(56): 29-40. (In Russian).
5. Iskra AA, Bakhurov VG. Natural radionuclides in biosphere. Moscow: Energoizdat; 1981. 124 p. (In Russian).
6. Ermolaeva-Makovskaya AP, Litver BYa. Lead-210 and polonium-210 in biosphere. Moscow: Atomizdat; 1978. 160 p. (In Russian).
7. Ilyin LA, Korenkov IP, Narkevich BYa. Textbook Radiation Hygiene. 5-th ed. Moscow: «GE'OTAR-Media»; 2017. 413 p. (In Russian).
8. Bresler SE. Radioactive elements. Moscow, Leningrad; 1952. pp. 224-228. (In Russian).
9. Sharafutdinova AF. Multifunctional measurements in the animals organism under the influence of erakond and fucorcin. Moscow; 2011. 141 p. (In Russian).
10. Procedure of measurements of the specific activities of ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{228}Th , ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{90}Sr radionuclides and gross specific activity of alpha, beta-emitting radionuclides in water using alpha-beta radiometer and alpha-spectrometer. Certificate of FGUP «D.I. Mendeleyev Institute for Metrology» № 1212/07 from 26.10.2007, 42 p. (In Russian)
11. Flynn WW. The determination of low levels of polonium-210 in the environmental materials. *Anal. Chem. Acta*. 1968; 43: 221.
12. MUK 4.3.2502-09 Methodical Instruction. MI 4.3.2502-09 Lead=210. Determination of the specific activity in the foodstuffs. Moscow, 2010. 27 p. (In Russian).
13. Foodstuffs consumption in the households in 2018. – Available from: https://www.gks.ru/bgd/regl/b19_101/Main.htm. [Accessed 07 April 2020].
14. Consumption of tea and coffee in Russia. – Available from: <https://iz.ru/625034/video/grafika-potreblenie-kofe-i-chaia-v-rossii>. [Accessed 08 April 2020]

Marina V. Kaduka

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev.

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: kaduka@mail.ru

15. Tea market in Russia in 2001-2016 years. Available from: <https://ab-centre.ru/news/rynok-chaya-rossii-v-2001-2016-gg> [Accessed 08 April 2020].
16. Kaduka MV, Basalaeva LN, Bekyasheva TA, Ivanov SA, Salazkina NV, Stupina VV. Radium isotopes content in the main doseforming products in the territories contaminated due to the accident on the Chernobyl NPP. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeyatelnosti* = *Biomedical problems of life*. 2019;2(22): 36–43. (In Russian).
17. Shutov VN, Kaduka MV, Bruk GYa, Bazyukin AB, Basalayeva LN. Dynamics of radioactive contamination of agricultural food products and natural foodstuffs after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Gygiyena*. 2008;1(3): 25-30. (In Russian).

Received: April 15, 2020

For correspondence: Marina V. Kaduka – Head of Radiochemical Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: kaduka@mail.ru)

Larisa N. Basalaeva – Senior Scientist, Radiochemical Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Tamara A. Bekyasheva – Leading Engineer-researcher, Radiochemical Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Sergey A. Ivanov – Junior Scientist, Radiochemical Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Nina V. Salazkina – Leading Engineer-researcher, Radiochemical Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Veronika V. Stupina – Leading Engineer-researcher, Radiochemical Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Aleksandra N. Kaduka – Phthisiatritian, St-Petersburg Tuberculosis Treatment Center № 3, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Kaduka M.V., Basalaeva L.N., Bekyasheva T.A., Ivanov S.A., Salazkina N.V., Stupina V.V., Kaduka A.N. ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb content in the certain types of foodstuffs. Optimization of the analytical method. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 2. pp. 65-74. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-65-74