

УДК 631.41:631.438

**Удельная активность  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  в системе почва-растение травянистых фитоценозов черноземов миграционно-сегрегационных Ростовской агломерации**

Козырев Денис Андреевич, Горбов Сергей Николаевич, Тагивердиев Сулейман Самидинович, Бураева Елена Анатольевна

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия,  
kozyrev@sfedu.ru*

*Аннотация.* В статье рассмотрены вопросы активности  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  в черноземах миграционно-сегрегационных и произрастающих на них травянистых растениях. Изучали почвы в пределах Ростовской агломерации и в ООПТ Ростовской области. Для расчета коэффициентов выноса и накопления рассчитывали средневзвешенную радиоактивность почв для 10, 30, 100-сантиметровой толщи на местах отбора растительных образцов. Коэффициент биологического накопления  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в травянистых формациях, сформированных на естественных почвах города и почвах ООПТ, превышает 1, что свидетельствует о их аккумуляции надземными частями растений. При этом наблюдается возрастание КБП с увеличением расчетной мощности корнеобитаемого слоя. Коэффициенты биологического поглощения  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  для всех изученных систем почва-растение близки к нулю.

*Ключевые слова:* Радионуклиды;  $^{40}\text{K}$ ;  $^{137}\text{Cs}$ ;  $^{226}\text{Ra}$ ;  $^{232}\text{Th}$ ; черноземы миграционно-сегрегационные.

**Specific activity of  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  in the soil-plant system of herbaceous phytocenoses of calcic chernozems of Rostov agglomeration**

Kozyrev Denis Andreevich, Gorbov Sergey Nikolaevich, Tagiverdiev Suleiman Samidinovich, Buraeva Elena Anatolievna

*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, kozyrev@sfedu.ru*

*Abstract.* The article deals with the activity of  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  in calcic chernozems and herbaceous plants growing it. Soils were studied within the Rostov agglomeration and in protected areas of the Rostov region. In order to calculate the removal and accumulation coefficients, weighted average soil radioactivity was calculated for 10, 30, and 100 centimeter thicknesses at the sites where plant samples were taken. The coefficient of biological accumulation of  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in herbaceous formations formed on natural soils of the city and soils of SPNA exceeds 1, which indicates their accumulation by above-ground parts of plants. At the same time, there is an increase in IPM with the increase in the calculated thickness of the rooting layer. The biological uptake coefficients of  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{232}\text{Th}$  for all studied soil-plant systems are close to zero.

*Keywords:* Radionuclides;  $^{40}\text{K}$ ;  $^{137}\text{Cs}$ ;  $^{226}\text{Ra}$ ;  $^{232}\text{Th}$ ; calcic chernozems.

**Введение.** Изучение удельной активности радионуклидов в почвах и растениях Ростовской области позволяет проводить систематический мониторинг радиационной обстановки в регионе с точки зрения биогеохимической миграции веществ. Это важно для выявления и контроля источников радиоактивного загрязнения, таких, как ядерные объекты, промышленные выбросы или природные источники. Подобный биогеохимический мониторинг помогает обнаруживать изменения в уровне радиации и принимать необходимые меры для обеспечения безопасности как населения, так и окружающей среды. Растения, выращиваемые в загрязненных почвах, могут потенциально накапливать радионуклиды, которые затем по трофическим цепям попадают в человеческий организм. Исследования удельной активности радионуклидов в растениях позволяют определить уровень радиационной нагрузки на естественные и урболандшафты и, как следствие, принять меры для снижения

потенциального воздействия на здоровье человека. Проведение регулярных измерений позволяет выявлять изменения в радиационной обстановке, связанные с возможными авариями или чрезвычайными ситуациями, и принимать оперативные меры для защиты населения.

В данной статье рассмотрены вопросы поступления и накопления радионуклидов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  в травянистых растениях, произрастающих на точках мониторинга в Ростовской агломерации и некоторых ООПТ Ростовской области. Для расчета коэффициентов выноса и накопления рассчитывали средневзвешенную радиоактивность почв для 10, 30, 100-сантиметровой толщи на местах отбора растительных образцов.

**Материалы и методы.** Исследованы почвы Ростовской агломерации черноземы миграционно-сегрегационные (обыкновенные карбонатные североприазовские) под травянистыми фитоценозами в границах агломерации, а также в ООПТ на территории Ростовской области.

Для определения участия травостоя в выносе радионуклидов в качестве модельных видов были выбраны злаковые травы, прежде всего из родов *Bromopsis*, *Festuca* и *Elytrigia*, присутствующий во всех типах исследуемых биотопов и дающий достаточную для анализа биомассу за счёт способности к быстрому вегетативному возобновлению. Так как глубина залегания корневых систем злаковых растений варьирует в широких пределах, то расчеты средневзвешенной удельной активности радионуклидов проводились для глубин 0–10, 0–30 и 0–100 см.

Удельную активность радионуклидов в почвах определяли гамма-спектрометрическим методом радионуклидного анализа. Использовали низкофоновую спектрометрическую установку (Buraeva et al., 2007) на основе полупроводникового коаксиального детектора из особо чистого германия (GeHP) с эффективностью 25 % в диапазоне 13–1500 кэВ,

отношением пик/комpton 51,7:1 (модель 7229N-7500sl-2520, Canberra Corporate Headquarters, Франция) (Прогресс, 2003; Прогресс, 2010).

**Результаты исследования и их обсуждение.** Для визуализации и анализа выборок удельной активности радионуклидов в почвенном профиле была использована диаграмма размаха. Диаграмма представляет собой графическое изображение статистических данных и позволяет оценить, как вариабельность, так и распределение значений внутри выборки. На диаграмме размаха для удельной активности радионуклидов в слоях 0–10, 0–30 и 0–100 см отображены такие параметры, как медианное значение, межквартильный размах без выбросов, выбросы и крайние точки. Выбранный вариант представления данных отображает статистические характеристики данных и позволяет анализировать вариацию и закономерности распределения и накопления радионуклидов в растениях и корнеобитаемом слое (рис. 1).

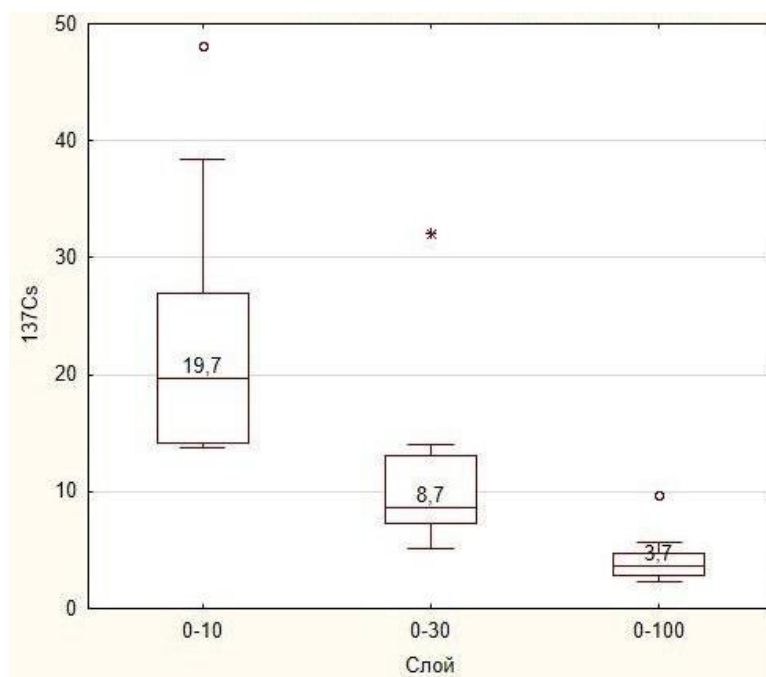


Рис. 1 – Диаграмма размаха удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  внутри почвенного профиля по слоям: 0–10, 0–30, 0–100 см

Медиана активности  $^{137}\text{Cs}$  в слое 0–10 см находится на уровне 19,7 Бк/кг, этот показатель наибольший по отношению к медианам в слое 0–30 и 0–100 см (рис. 1). В то же время на отдельных точках мониторинга в слое 0–10 см имеется пик, составляющий 48,1 Бк/кг, что свидетельствует о наличии техногенных аномалии. Преимущественно поверхностное накопление  $^{137}\text{Cs}$  некоторые авторы, связывают со спецификой его миграции при повышенном содержании гумуса и фракции физической глины в почвах. В слое 0–30 см медиана снижается до 8,7 Бк/кг, а в слое 0–100 см - до 3,7 Бк/кг.

Полученные значения указывают на уменьшение активности цезия с глубиной почвенного профиля. Вероятно, это связано с путями его поступления и перемещения внутри почвы, которые могут быть как природными, так и антропогенными. Ряд авторов указывает следующие варианты переноса радионуклидов из атмосферы в почву с последующей их миграцией:

1. Атмосферное осаждение: цезий может быть перенесен из атмосферы и осадаться на почвенную поверхность. Основным источником атмосферного цезия являются ядерные испытания и аварии на ядерных объектах. Радиоактивные облака и аэрозоли, содержащие цезий, могут перемещаться с воздушными массами и оседать на почве под воздействием осадков (Garmash et al., 2019).

2. Распространение через растения: растения могут поглощать радионуклид цезий из почвы через корни. Поступление цезия в почву через корни растений происходит в основном из растворенной формы, процесс зависит от свойств почвы и доступности цезия для поглощения растениями (Skipperud et al., 2012).

3. Биологический перенос: цезий может быть перенесен в почву через биологические процессы, включая детритофагию (поглощение органических остатков) и микробиологическую активность в почве. Микроорганизмы

могут играть важную роль в переработке органического материала и перераспределении радионуклидов в почвенном профиле (Howard et al., 2010).

В распределении  $^{40}\text{K}$  наблюдается относительная стабильность активности в почвенном профиле (рис. 2). Медиана в слое 0–10 см составляет 400,0 Бк/кг, в слое 0–30 см – 400,5 Бк/кг и в слое 0–100 см – 341,8 Бк/кг. Размах значений не сильно меняется с глубиной, хотя в слое 0–30 см есть выброс, равный 192,1 Бк/кг, указывающий на наличие широкого размаха в активности калия в средней и нижней частях гумусово-аккумулятивного горизонта.

Зависимость активности радионуклида  $^{40}\text{K}$  от концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в почве может варьировать от различных факторов, таких, как тип почвы, геологические условия, история загрязнения и др. Не существует общей универсальной зависимости между концентрациями этих двух радионуклидов, так как их источники и химические свойства различны по сути. Однако, в отдельных работах авторы приводят корреляции между концентрациями  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в почве. Например, в работе Degering с соавторами (2011) было описано, что в некоторых регионах Финляндии наблюдается положительная корреляция между концентрациями калия и цезия в поверхностных слоях почвы. Это связано с тем, что оба элемента являются щелочными металлами и могут иметь схожее поведение в почвенной системе.

Стоит отметить, что в изученной нами выборке подобные корреляции наблюдаются не всегда, и каждый случай может иметь свои уникальные особенности. Для более точного понимания зависимости между активностью  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в отдельно взятом почвенном разрезе или на определенной территории рекомендуется учитывать местные условия и факторы, влияющие на их распределение и накопление.

Распределение активности  $^{226}\text{Ra}$ , как и других изучаемых радионуклидов в почвенном профиле также сопряжено с различными факторами, включая физические, химические, физико-химические свойства почвы, а также способы его поступления в почву. Для радионуклида  $^{226}\text{Ra}$  медианные значения практически одинаковы: в слое 0–10 см оно составляет 23,3 Бк/кг, а для слоев 0–30 и 0–100 см – 22,6 Бк/кг. Однако размах значений в слое 0–30 см так же, как и у  $^{40}\text{K}$  выше, и здесь наблюдается пик, равный 14,9 Бк/кг в слое 0–100 см (рис. 2).

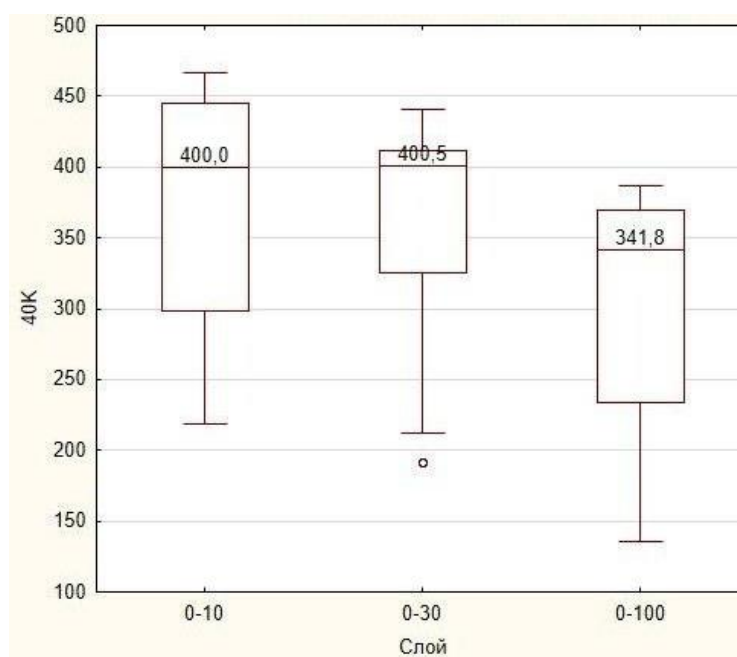


Рис. 2 – Диаграмма размаха удельной активности  $^{40}\text{K}$  внутри почвенного профиля по слоям: 0–10, 0–30, 0–100 см

Одним из важных факторов, влияющих на распределение радионуклидов в почвенном профиле, является его фиксация или связывание с глинистыми минералами и почвенными частицами фракции физической глины, т. е. менее 0,01 мм. Радий, как радиоактивный элемент, имеет тенденцию к адсорбции на поверхности минералов, особенно на глинистых и оксидах железа и алюминия (Kozyrev et al., 2021). Это может приводить к

накоплению радия в верхних слоях почвы, где в составе ППК присутствуют минеральные компоненты с более высокой активной поверхностью.

Как следствие, в нижних слоях почвы механизмы адсорбции и ретенции радия могут быть менее эффективными, что приводит к более низким показателям его активности (рис. 3). Высокие значения активности в слое 0–30 см могут быть связаны с некоторыми процессами перераспределения и перемещения радия в более глубокие горизонты почвы.

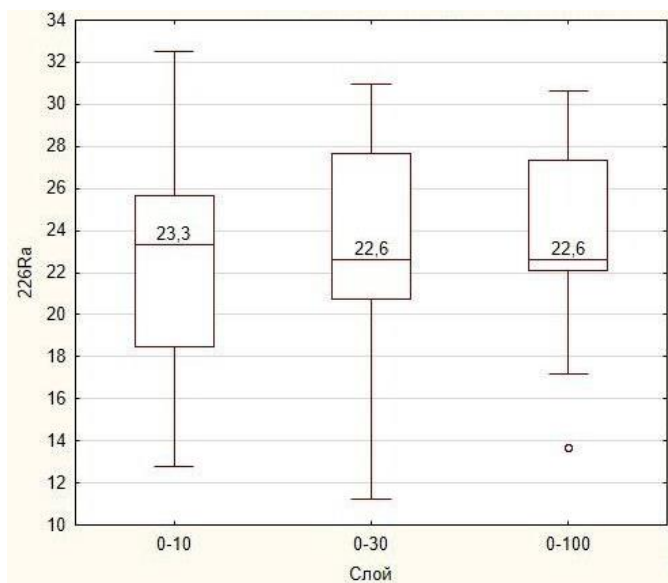


Рис. 3 – Диаграмма размаха удельной активности  $^{226}\text{Ra}$  внутри почвенного профиля по слоям: 0–10, 0–30, 0–100 см

Существует множество исследований, посвященных распределению радия в почвенном профиле и его взаимосвязи с физико-химическими свойствами почвы (Бураева и др., 2013; Шапошникова, Шуктомова, 2016). Например, в исследовании Lopez-Perez с соавторами (2019) было изучено распределение радия в почвах уранового рудника. Авторы указывают на его накопление в верхних слоях, и связывают данный процесс с физико-химическими свойствами минералов и плотностью почвы.



В работе Franco-Uría и его коллег (2011) было описано распределение естественных радионуклидов в различных типах почв и выявлена связь между активностью радия и содержанием органического вещества, минеральным и гранулометрическим составом почвы.

Медианное значение  $^{232}\text{Th}$  в слое 0–10 см составляет 26,6 Бк/кг, в слое 0–30 см 28,8 Бк/кг, в слое 0–100 см – 23,0 Бк/кг. Размах значений для слоев 0–10 и 0–100 см находится примерно на одном уровне, однако наблюдаются единичные пики активности слое 0–10 см – 14,0 Бк/кг и в слое 0–30 см 13,7 Бк/кг (рис. 4).

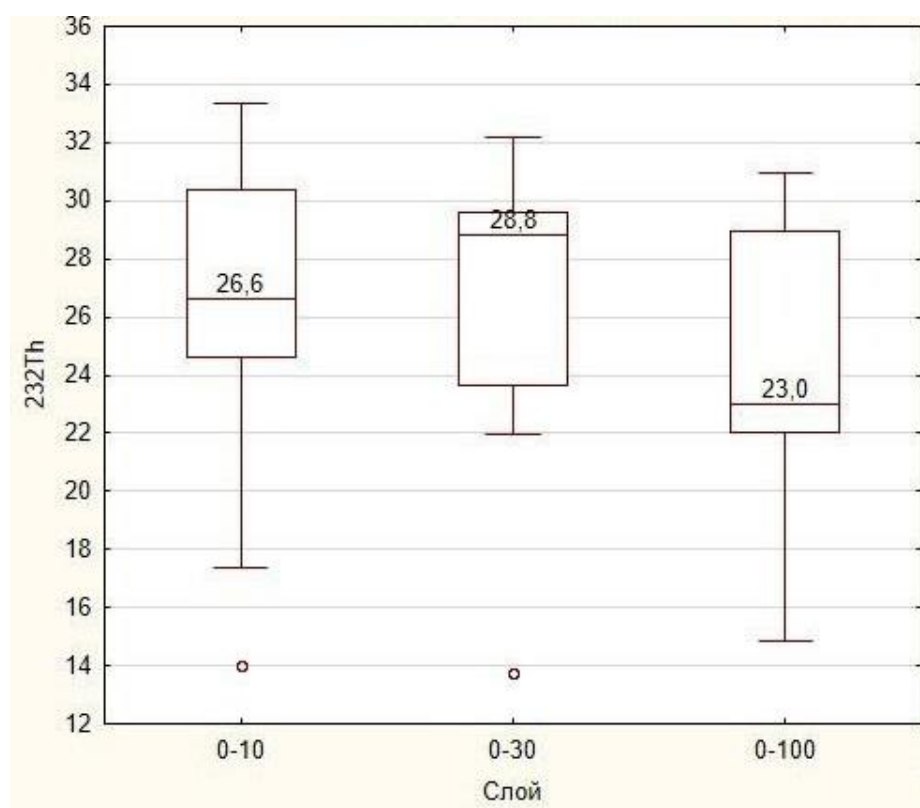


Рис. 4 – Диаграмма размаха удельной активности  $^{232}\text{Th}$  внутри почвенного профиля по слоям: 0–10, 0–30, 0–100 см

Подобное распределение радионуклида  $^{232}\text{Th}$  в почвенном профиле также напрямую зависит от специфики физических и химических свойств почвы. Так в ряде работ (Boulyga, Neumann, 2002; Venteris, Barriuso, 2003;

Gerzabek et al., 2005; Sharma et al., 2017) указывается взаимосвязь со следующими факторами:

1. Торий, может связываться с минеральными и органическими частицами почвы, что влияет на их распределение в почвенном профиле. Различные типы минералов имеют разную аффинность к радионуклидам, и поэтому их содержание в почве может влиять на концентрацию тория в отдельных слоях. Например, минералы глинистой фракции почвы обладают высокой способностью адсорбировать торий.

2. Миграция и перемещение: Физико-химические свойства почвы, такие, как текстура, структура и пористость, могут влиять на перемещение радионуклидов в почвенном профиле. Например, в слое 0–10 см, где наблюдается наибольшая концентрация тория, возможно наличие более высокой плотности глинистых частиц или более плотной структуры, что способствует его накоплению в данном слое.

3. Разложение органического вещества: Органическое вещество в почве может играть роль в связывании и удержании радионуклидов. Высокое содержание органического вещества в верхних слоях почвы может способствовать накоплению тория в слое 0–10 см.

Поглощение радиоактивных изотопов растениями из почв в целом аналогично поглощению большинства микроэлементов. Эффективность этого процесса зависит от ряда факторов: влажности, температуры, концентрации ионов в почвенном растворе, наличия мешающих ионов в почве, наличия микоризы, микробиологического состава почвы, видовых особенностей растений и др. (Москалев и др., 2015; Кидин, Торшин, 2016).

Несмотря на то, что калий не входит в состав органических соединений, он является основным элементом питания растений, присутствуя повсеместно в ионной форме и обеспечивая гомеостаз клеток и тканей. Корневое усвоение калия из почвы осуществляется с помощью

корневых волосков, которые активно поглощают ионы  $K^+$  из почвенного раствора. Этот процесс требует энергии и контролируется ионными каналами на поверхности корневых клеток, которые позволяют селективно проникать ионам  $K^+$  и исключать другие ионы (Кидин, Торшин, 2016).

При этом степень поглощения  $^{40}K$  растениями может несколько варьировать по отношению к стабильным изотопам. Для  $^{40}K$  и  $^{137}Cs$  отмечаются коэффициенты, превышающие 1, что оценивается как сильное накопление. Также наблюдается возрастание коэффициента с увеличением мощности корнеобитаемого слоя. Такой эффект сопряжен, прежде всего, с уменьшением средневзвешенной активности  $^{40}K$  в почве с глубиной. Таким образом можно заключить что в результате действия растительных ассоциаций в корнеобитаемом слое образуется градиент активности  $^{40}K$  с ярко выраженным накоплением на поверхности почвы.

$^{137}Cs$  искусственный радионуклид проявляет химические свойства идентичные стабильному  $^{133}Cs$  (Tsukada et al., 2002; Tsukada et al., 2003; Uchida, Tagami, 2007). Таким образом высокая химическая активность и аэральное поступление  $^{137}Cs$  приводит к высоким показателям его активности (Бк/кг) в верхнем слое почвы. При этом в отличие от  $^{40}K$ , КБП  $^{137}Cs$  для слоя почвы 0–10 см составляет 0,01–0,66, что в целом повторяет данные исследований Липатова с соавторами (2022) и оценивается как отсутствие накопления. Нужно отметить, что некоторые авторы связывают поглощение  $^{137}Cs$  с содержанием ионов калия и аммония в почве, указывая на их антогонизм (Salt et al., 2004; Konopleva et al., 2009; Ogasawara et al., 2019). Авторы Y-G. Zhu и E. Smolders (2000) отмечали, что поглощение  $^{137}Cs$  растениями происходит по тем же каналам что и калий. Кроме того, другим фактором, влияющим на поглощение цезия, является pH почвы. В щелочных почвах (с высоким pH) поглощение цезия растениями может быть более интенсивным, чем в кислых почвах (с низким pH). Это объясняется тем, что

калий более подвижен в кислых почвах, а процессы аммонификации преобладают над процессами нитрификации, что приводит к накоплению аммония в почвах и как следствие блокированию поступления  $^{137}\text{Cs}$  в растения (Середина, 2007; Новосёлов, 2015).

Коэффициент биологического поглощения  $^{137}\text{Cs}$  увеличивается с увеличением расчетной мощности корнеобитаемого слоя по тем же причинам, что и  $^{40}\text{K}$ . В результате можно заключить, что методы фиторемедиации почв, загрязненных  $^{137}\text{Cs}$ , нецелесообразны, поскольку требуют много времени и образуют множество отходов. Однако при этом миграцию  $^{137}\text{Cs}$  в биогеохимическом цикле можно регулировать с помощью изменения рН почвы и увеличения содержания ионов калия и аммония в почвенном растворе.

Коэффициенты биологического поглощения  $^{226}\text{Ra}$  практически во всех изученных вариантах близки к нулю. Исследователи отмечают, что поглощение  $^{226}\text{Ra}$  растениями уменьшается в присутствии ионов щелочноземельных металлов с меньшим радиусом ядра, в большей степени это относится к магнию (Ашкинази, 1988; Girault et al., 2021). Также отмечается, что  $^{226}\text{Ra}$  аккумулируется преимущественно в корнях растений (Girault et al., 2021)., что в целом объясняет полученный результат, т.к., во-первых, была проанализирована надземная часть растений, во-вторых, для изучаемых почв характерно высокое содержание карбонатов кальция. Кроме того, отдельные авторы отмечают, что поглощение радия растениями обычно медленное и менее эффективное по сравнению с другими радионуклидами, такими, как цезий, стронций, уран (Ibrahim, Whicker, 1992; Da Conceição et al., 2009; James et al., 2011).

На изученных площадках мониторинга отмечается минимальное поглощение  $^{232}\text{Th}$  растениями из почвы, показатель КБП не превышает 0,14. В целом вопросы биогенной миграции данного радионуклида очень слабо

отражены в литературе, отдельные авторы отмечают, схожесть зависимостей между свойствами почв и степенью поглощения растениями  $^{232}\text{Th}$  и  $^{226}\text{Ra}$  (Bal et al., 2023; Duong et al., 2020).

**Заключение.** Величина коэффициента биологического накопления  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в травянистых формациях, сформированных на естественных почвах города и почвах ООПТ, превышает 1, что свидетельствует о их аккумуляции наземными частями растений. При этом наблюдается возрастание КБП с увеличением расчетной мощности корнеобитаемого слоя (в черноземе миграционно-сегрегационном величина коэффициента для  $^{137}\text{Cs}$  при его расчете для корнеобитаемого слоя мощностью 0–10 см составила 0,66; в то время как для глубины 0–30 см и 0–100 см значение КБП возрастает до 1,74 и 4,04 соответственно). Коэффициенты биологического поглощения  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  для всех изученных систем почва-растение близки к нулю.

**Финансирование работы.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2023-0008.

### Литература.

1. Ашкинази Э.И. Оценка поступления магния, кальция,  $^{226}\text{Ra}$  из почв в сельскохозяйственные растения / Э.И. Ашкинази // Гигиена и санитария. – 1988. – № 1. – С. 39–41.
2. Бураева Е.А. Содержание и распределение естественных радионуклидов в различных типах почвы Ростовской области / Е.А. Бураева, В.С. Малышевский, Т.В. Вардуни [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4. – С. 269.
3. Кидин В.В. Агрохимия: учебник / В.В. Кидин, С.П. Торшин. – М.: Проспект, 2016. – 608 с. – ISBN 978-5-392-18668-6.

4. Липатов Д.Н. Изотопное соотношение  $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$  в почвах и растительном покрове лесных экосистем (обзор). / Д.Н. Липатов, А.И. Щеглов, Д.В. Манахов [и др.] // Вестник Московского Университета. Серия 17. Почвоведение. – 2022. – № 4. – С. 11–19.
5. Москалев Н.Н. Особенности процессов переноса радионуклидов в системе почва – объекты брαιοфлоры / Н.Н. Москалев, Ф.Ш. Арысланова, Е.В. Дергачева [и др.] // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: посвящается 100-летию юбилею Южного федерального университета. Посвящается 100-летию юбилею кафедры физической географии, экологии и охраны природы ЮФУ, Ростов-на-Дону, 12–16 октября 2015 года. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2015. – С. 228–232.
6. Новосёлов С.И. Влияние агроэкологических условий на аммонифицирующую и нитрифицирующую способность почвы / С.И. Новосёлов // Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». – 2015. – № 4. – С. 42–46.
7. Прогресс 2003. Методика измерения радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс», Менделеево 2003. – 54 с.
8. Прогресс 2010. ФВКМ.412131.002-03РЭ Комплекс спектрометрический для измерений активности альфа-, бета- и гамма-излучающих нуклидов «Прогресс». Гамма-спектрометр сцинтилляционный «Прогресс-гамма». М.: ЗАО НПП «Доза», 2010. – 54 с.
9. Середина В.П. Геохимические особенности поведения калия в почвах // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2007. – № 1. – С. 106–118.

10. Соболева И.А. Руководство по методам контроля за радиоактивностью окружающей среды. / И.А. Соболева. – М.: Медицина, 2002. – 432 с.
11. Шапошникова Л.М. Особенности распределения урана, тория и радия в профиле техноподзолистой почвы / Л.М. Шапошникова, И.И. Шуктомова // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 6. – С. 48–52.
12. Bal S.Ş. Soil to plant transfer of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{137}\text{Cs}$  to some medicinal and aromatic plants growing in Bitlis (Turkey) / S.Ş. Bal, M. Kurşat, M.F. Kuluöztürk [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2023. – Vol. 257. – P. 107089. DOI 10.1016/j.jenvrad.2022.107089.
13. Boulyga S.F. Distribution of uranium isotopes in environmental samples using ICP-MS. / S.F. Boulyga, K.G. Heumann // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 2002. – Vol. 17(11). – P. 1352–1357.
14. Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Stasov V.V. Components of the Background of  $\text{Ge(Li)}$  and  $\text{Ge}$  detectors in passive shielding // Atomic Energy, 2007. Vol. 103 (5). – P. 895–900.
15. Da Conceição F.T. Distribution of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in soils and sugar cane crops at Corumbataí river basin, São Paulo State, Brazil. / F.T. da Conceição, D.M. Bonotto, J.R. Jimenez-Rueda [et al.] // Applied Radiation and Isotopes. – 2009. – Vol. 67. – № 6. – P. 1114–1120. DOI 10.1016/j.apradiso.2009.02.086.
16. Degering A., Correlation between potassium and cesium in surface soils of Finland / A. Degering, P. Laihonon, P. Vesterbacka // Journal of Environmental Radioactivity. – 2011. – Vol. 102. – № 11. – P. 1007–1011. DOI 10.1016/j.jenvrad.2011.07.008.
17. Duong V.H. Study of soil to plant transfer factors of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in Vietnamese crops / V.H. Duong, T.D. Nguyen, A. Peka [et al.] //

Journal of Environmental Radioactivity. – 2020. – Vol. 223. – P. 106416. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106416

18. Franco-Uria A., Distribution of natural radionuclides in soil profiles: Effect of soil properties and landscape characteristics / A. Franco-Uria, C. Lopez-Mateo, L. Roca-Perez // Journal of Environmental Radioactivity. – 2011. – Vol. 102(11). P. 1092–1099. DOI 10.1016/j.jenvrad.2011.06.007.

19. Garmash K.S. Cesium in soils: Sources, behavior, and environmental impact / K.S. Garmash, A.I. Nikitin, I.B. Vlasova // Geoderma. – 2019. – Vol. 349. – P. 128–145.

20. Gerzabek M.H. Influence of soil organic matter on the sorption of radionuclides / M.H. Gerzabek, G. Haberhauer, H. Kirchmann [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2005. – Vol. 78(1). – P. 65–89.

21. Girault F. Substratum influences uptake of radium-226 by plants / F. Girault, F. Perrier, J.M. Ourcival [et al.] // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 766. – P. 142655. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.142655.

22. Howard B.J. Transfer of radionuclides to animals / B.J. Howard, N.A. Beresford, C.L. Barnett // Radioactivity in the Environment. – 2010. – Vol. 16. – P. 55–106. DOI 10.1016/S1569-4860(10)16002-7.

23. Ibrahim S. Comparative plant uptake and environmental behavior of U-series radionuclides at a uranium mine-mill / S. Ibrahim, F. Whicker // Journal of radioanalytical and nuclear chemistry. – 1992. – Vol. 156. – № 2. – P. 253–267.

24. James J.P. Soil to leaf transfer factor for the radionuclides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  at Kaiga region, India / J.P. James, B.N. Dileep, P.M. Ravi [et al.] // Journal of environmental radioactivity. – 2011. – Vol. 102. – № 12. – P. 1070–1077. DOI 10.1016/j.jenvrad.2011.07.011.

25. Konopleva I. Migration and bioavailability of  $^{137}\text{Cs}$  in forest soil of southern Germany / I. Konopleva, E. Klemm, A. Konoplev [et al.] // Journal of



Environmental Radioactivity. – 2009. – Vol. 100. – № 4. – P. 315–321. DOI 10.1016/j.jenvrad.2008.12.010.

26. Kozyrev D. Activity Concentration of Natural Radionuclides and Total Heavy Metals Content in Soils of Urban Agglomeration / D. Kozyrev, S. Gorbov, O. Bezuglova [et al.] // Advanced Technologies for Sustainable Development of Urban Green Infrastructure: Proceedings of Smart and Sustainable Cities 2020. Springer Geography. – 2021. – P. 111–122. DOI 10.1007/978-3-030-75285-9\_11.

27. Lopez-Perez M. Radionuclide Distribution in Soils of an Uranium Mining Area / M. Lopez-Perez, F. Vaca, C. Alonso-Hernandez [et al.] // Minerals. – 2019. – Vol. 9(8). – P. 492.

28. Ogasawara S. Phytoavailability of  $^{137}\text{Cs}$  and stable Cs in soils from different parent materials in Fukushima, Japan / S. Ogasawara, T. Eguchi, A. Nakao [et al.] // Journal of environmental radioactivity. – 2019. – Vol. 198. – P. 117–125. DOI 10.1016/j.jenvrad.2018.12.028.

29. Salt C.A. The influence of season and leaf age on concentrations of radiocaesium ( $^{137}\text{Cs}$ ), stable caesium ( $^{133}\text{Cs}$ ) and potassium in *Agrostis capillaris* / C.A. Salt, J.W. Kay, K.E. Jarvis // Environmental Pollution. – 2004. – Vol. 130. – № 3. – P. 359–369. DOI 10.1016/j.envpol.2004.01.001.

30. Sharma P. Impact of soil characteristics on the migration of radionuclides in soil / P. Sharma, S. Sharma, S.K. Sharma // Journal of Environmental Management. – 2017. – Vol. 197. – P. 109–119.

31. Skipperud L. The role of soil properties on the behavior of  $^{137}\text{Cs}$  in boreal forest ecosystems / L. Skipperud, B. Salbu, K. Jolle // Journal of Environmental Radioactivity. – 2012. – Vol. 113. – P. 63–70

32. Tsukada H. Rice uptake and distributions of radioactive  $^{137}\text{Cs}$ , stable  $^{133}\text{Cs}$  and K from soil / H. Tsukada, H. Hasegawa, S. Hisamatsu [et al.] //

Environmental Pollution. – 2002. – Vol. 117. – № 3. – P. 403–409. DOI  
10.1016/s0269-7491(01)00199-3

33. Tsukada H. Transfer of  $^{137}\text{Cs}$  and stable Cs in soil-grass-milk pathway in Aomori, Japan / H. Tsukada, S. Hisamatsu, J. Inaba // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2003. – Vol. 255. – № 3. – P. 455–458. DOI 10.1023/A:1022507710447

34. Uchida S. Soil-to-plant transfer factors of fallout  $^{137}\text{Cs}$  and native  $^{133}\text{Cs}$  in various crops collected in Japan / S. Uchida, K. Tagami // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2007. – Vol. 273. – № 1. – P. 205–210. DOI 10.1007/S10967-007-0737-5.

35. Venteris E.R. Migration of radionuclides in soil: influence of chemical and physical soil characteristics / E.R. Venteris, E. Barriuso // Journal of Environmental Radioactivity. – 2003. – Vol. 65(3). – P. 215–232

36. Zhu, Y.G. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application / Y.G. Zhu, E. Smolders // Journal of experimental botany. – 2000. – Vol. 51. – № 351. – P. 1635–1645. DOI 10.1093/jexbot/51.351.1635.

## References

1. Ashkinazi E.I. Assessment of magnesium, calcium,  $^{226}\text{Ra}$  intake from soils into agricultural plants / E.I. Ashkinazi // Hygiene and Sanitation. - 1988. - № 1. - P. 39-41.

2. Buraeva E.A. Content and distribution of natural radionuclides in different types of soil of Rostov region / E.A. Buraeva, V.S. Malyshevskiy, T.V. Varduni [et al.] // Modern problems of science and education. - 2013. - № 4. - P. 269.

3. Kidin V.V. Agrochemistry: textbook / V.V. Kidin, S.P. Torshin. Kidin, S.P. Torshin. - Moscow: Prospect, 2016. - 608 p. - ISBN 978-5-392-18668-6.
4. Lipatov D.N.  $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$  isotopic ratio in soils and vegetation cover of forest ecosystems (review). / D.N. Lipatov, A.I. Shcheglov, D.V. Manakhov [et al.] // Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science. - 2022. - № 4. - P. 11-19.
5. Moskalev N.N. Features of radionuclide transfer processes in the system soil - bryoflora objects / N.N. Moskalev, F.Sh. Aryslanova, E.V. Dergacheva [et al.] // Ecological Problems. A look into the future: dedicated to the 100th anniversary of the Southern Federal University. Dedicated to the 100th anniversary of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation of the South Federal University, Rostov-on-Don, October 12-16, 2015. - Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2015. - P. 228-232.
6. Novosyolov S.I. Influence of agroecological conditions on ammonifying and nitrifying capacity of soil / S.I. Novosyolov // Bulletin of Mari State University. Series "Agricultural sciences. Economic Sciences". - 2015. - № 4. - P. 42-46.
7. Progress 2003. Methodology of radionuclide measurement using scintillation gamma spectrometer with software "Progress", Mendeleev 2003. - 54 p.
8. Progress 2010. FVKM.412131.002-03RE Spectrometric complex for measurements of alpha-, beta- and gamma-emitting nuclides activity "Progress". Gamma-gamma scintillation spectrometer "Progress-gamma". Moscow: ZAO NPP "Doza", 2010. - 54 p.
9. Seredina, V.P. Geochemical features of potassium behavior in soils // Bulletin of Tomsk State University. Biology. - 2007. - № 1. - C. 106-118.

10. Soboleva I.A. Manual on the methods of control over the radioactivity of the environment. / I.A. Soboleva. - Moscow: Medicine, 2002. - 432 p.
11. Shaposhnikova L.M. Peculiarities of uranium, thorium and radium distribution in the profile of technopodzolic soil / L.M. Shaposhnikova, I.I. Shaposhnikova. // Advances in modern natural science. - 2016. - № 6. - P. 48-52.
12. Bal S.Ş. Soil to plant transfer of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{137}\text{Cs}$  to some medicinal and aromatic plants growing in Bitlis (Turkey) / S.Ş. Bal, M. Kurşat, M.F. Kuluöztürk [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2023. – Vol. 257. – P. 107089. DOI 10.1016/j.jenvrad.2022.107089.
13. Boulyga S.F. Distribution of uranium isotopes in environmental samples using ICP-MS. / S.F. Boulyga, K.G. Heumann // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 2002. – Vol. 17(11). – P. 1352–1357.
14. Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Stasov V.V. Components of the Background of  $\text{Ge(Li)}$  and  $\text{Ge}$  detectors in passive shielding // Atomic Energy, 2007. Vol. 103 (5). – P. 895–900.
15. Da Conceição F.T. Distribution of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in soils and sugar cane crops at Corumbataí river basin, São Paulo State, Brazil. / F.T. da Conceição, D.M. Bonotto, J.R. Jimenez-Rueda [et al.] // Applied Radiation and Isotopes. – 2009. – Vol. 67. – № 6. – P. 1114–1120. DOI 10.1016/j.apradiso.2009.02.086.
16. Degering A., Correlation between potassium and cesium in surface soils of Finland / A. Degering, P. Laihonon, P. Vesterbacka // Journal of Environmental Radioactivity. – 2011. – Vol. 102. – № 11. – P. 1007–1011. DOI 10.1016/j.jenvrad.2011.07.008.
17. Duong V.H. Study of soil to plant transfer factors of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in Vietnamese crops / V.H. Duong, T.D. Nguyen, A. Peka [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2020. – Vol. 223. – P. 106416. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106416

18. Franco-Uria, A., Distribution of natural radionuclides in soil profiles: Effect of soil properties and landscape characteristics / A. Franco-Uria, C. Lopez-Mateo, L. Roca-Perez // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2011. – Vol. 102(11). P. 1092–1099. DOI 10.1016/j.jenvrad.2011.06.007.
19. Garmash K.S. Cesium in soils: Sources, behavior, and environmental impact / K.S. Garmash, A.I. Nikitin, I.B. Vlasova // *Geoderma*. – 2019. – Vol. 349. – P. 128–145.
20. Gerzabek M.H. Influence of soil organic matter on the sorption of radionuclides / M.H. Gerzabek, G. Haberhauer, H. Kirchmann [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2005. – Vol. 78(1). – P. 65–89.
21. Girault F. Substratum influences uptake of radium-226 by plants / F. Girault, F. Perrier, J.M. Ourcival [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 766. – P. 142655. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.142655.
22. Howard B.J. Transfer of radionuclides to animals / B.J. Howard, N.A. Beresford, C.L. Barnett // *Radioactivity in the Environment*. – 2010. – Vol. 16. – P. 55–106. DOI 10.1016/S1569-4860(10)16002-7.
23. Ibrahim S. Comparative plant uptake and environmental behavior of U-series radionuclides at a uranium mine-mill / S. Ibrahim, F. Whicker // *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*. – 1992. – Vol. 156. – № 2. – P. 253–267.
24. James J.P. Soil to leaf transfer factor for the radionuclides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  at Kaiga region, India / J.P. James, B.N. Dileep, P.M. Ravi [et al.] // *Journal of environmental radioactivity*. – 2011. – Vol. 102. – № 12. – P. 1070–1077. DOI 10.1016/j.jenvrad.2011.07.011.
25. Konopleva I. Migration and bioavailability of  $^{137}\text{Cs}$  in forest soil of southern Germany / I. Konopleva, E. Klemm, A. Konoplev [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2009. – Vol. 100. – № 4. – P. 315–321. DOI 10.1016/j.jenvrad.2008.12.010.

26. Kozyrev D. Activity Concentration of Natural Radionuclides and Total Heavy Metals Content in Soils of Urban Agglomeration / D. Kozyrev, S. Gorbov, O. Bezuglova [et al.] // *Advanced Technologies for Sustainable Development of Urban Green Infrastructure: Proceedings of Smart and Sustainable Cities 2020*. Springer Geography. – 2021. – P. 111–122. DOI 10.1007/978-3-030-75285-9\_11.
27. Lopez-Perez M. Radionuclide Distribution in Soils of an Uranium Mining Area / M. Lopez-Perez, F. Vaca, C. Alonso-Hernandez [et al.] // *Minerals*. – 2019. – Vol. 9(8). – P. 492.
28. Ogasawara S. Phytoavailability of  $^{137}\text{Cs}$  and stable Cs in soils from different parent materials in Fukushima, Japan / S. Ogasawara, T. Eguchi, A. Nakao [et al.] // *Journal of environmental radioactivity*. – 2019. – Vol. 198. – P. 117–125. DOI 10.1016/j.jenvrad.2018.12.028.
29. Salt C.A. The influence of season and leaf age on concentrations of radiocaesium ( $^{137}\text{Cs}$ ), stable caesium ( $^{133}\text{Cs}$ ) and potassium in *Agrostis capillaris* / C.A. Salt, J.W. Kay, K.E. Jarvis // *Environmental Pollution*. – 2004. – Vol. 130. – № 3. – P. 359–369. DOI 10.1016/j.envpol.2004.01.001.
30. Sharma P. Impact of soil characteristics on the migration of radionuclides in soil / P. Sharma, S. Sharma, S.K. Sharma // *Journal of Environmental Management*. – 2017. – Vol. 197. – P. 109–119.
31. Skipperud L. The role of soil properties on the behavior of  $^{137}\text{Cs}$  in boreal forest ecosystems / L. Skipperud, B. Salbu, K. Jolle // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2012. – Vol. 113. – P. 63–70
32. Tsukada H. Rice uptake and distributions of radioactive  $^{137}\text{Cs}$ , stable  $^{133}\text{Cs}$  and K from soil / H. Tsukada, H. Hasegawa, S. Hisamatsu [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2002. – Vol. 117. – № 3. – P. 403–409. DOI 10.1016/s0269-7491(01)00199-3

33. Tsukada H. Transfer of  $^{137}\text{Cs}$  and stable Cs in soil-grass-milk pathway in Aomori, Japan / H. Tsukada, S. Hisamatsu, J. Inaba // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2003. – Vol. 255. – № 3. – P. 455–458. DOI 10.1023/A:1022507710447
34. Uchida S. Soil-to-plant transfer factors of fallout  $^{137}\text{Cs}$  and native  $^{133}\text{Cs}$  in various crops collected in Japan / S. Uchida, K. Tagami // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2007. – Vol. 273. – № 1. – P. 205–210. DOI 10.1007/S10967-007-0737-5.
35. Venteris E.R. Migration of radionuclides in soil: influence of chemical and physical soil characteristics / E.R. Venteris, E. Barriuso // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2003. – Vol. 65(3). – P. 215–232
36. Zhu Y.G. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application / Y.G. Zhu, E. Smolders // *Journal of experimental botany*. – 2000. – Vol. 51. – № 351. – P. 1635–1645. DOI 10.1093/jexbot/51.351.1635.