

Ю. В. Хомутинин*, В. А. Кашпаров, Л. Н. Отрешко, Л. В. Йошенко

*Український науково-дослідницький інститут сільськогосподарської радіології
НУБіП України, Київ, Україна*

*Ответственный автор: khomutinin@gmail.com

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ^{129}I В ЛУГОВОМ РАЗНОТРАВЬЕ
ПАСТБИЩ КОРОСТЕНСКОГО И НАРОДИЧЕВСКОГО РАЙОНОВ**

На основании вероятностного подхода к описанию возможных значений коэффициентов перехода и содержания ^{129}I в почве и растениях для территорий, загрязненных чернобыльскими радиоактивными выпадениями, предложены методология и экспресс-метод прогнозирования содержания ^{129}I в луговом разнотравье без непосредственных измерений его в почве.

Ключевые слова: изотопы йода ^{127}I и ^{129}I , биогенные потоки, миграция, луговое разнотравье, прогноз, коэффициент накопления.

В результате Чернобыльской аварии в 1986 г. и аварии на АЭС Фукусима-1 в 2011 г. в атмосферу было выброшено приблизительно одинаковая активность ^{129}I – около $4\cdot 6\cdot 10^{10}$ Бк [1, 2], что привело к увеличению на порядки величины отношения $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ в окружающей среде [3, 4].

Йод является важным биогенным элементом для организма человека и других млекопитающих. Научный комитет по действию атомной радиации (НКДАР) ООН рассматривает пять путей поступления йода в организм человека [5]: ингаляция (0,29 мкг/сут); аэральное осаждение йода из атмосферы на сельскохозяйственные культуры с последующим поглощением человеком, молочным и мясным скотом, который впоследствии попадает в организм человека (6,6 мкг/сут); потребление поверхностных вод (5,3 мкг/сут); употребление морской рыбы и моллюсков (11 мкг/сут); корневое поступление из почвы и поверхностных вод в сельскохозяйственные культуры, продукцию животноводства и в организм человека (200 мкг/сут). Таким образом, основным путем поступления йода в организм человека считается корневое поступление по цепи: почва - растения - продукция животноводства - человек. Молоко коров является одним из основных источников поступления йода в организм человека. Содержание йода в молоке определяется его содержанием в компонентах суточного рациона, и в первую очередь траве и сене, а также в потребляемой животными воде.

^{129}I имеет период полураспада 15,7 млн лет, поэтому может оказывать существенное влияние на изменение радиологической обстановки на Земле и формирование коллективной дозы облучения человека в течение больших временных интервалов. Среднее потребление ^{129}I человеком

НКДАР оценивает с помощью коэффициентов его перехода из почвы и воды в пищевые продукты, не используя количество потребления стабильного йода. Полученные результаты показывают, что при одинаковой скорости поступления летучих долгоживущих радионуклидов (^3H , ^{12}C , ^{85}Kr , ^{129}I) в атмосферу именно ^{129}I дает наибольший вклад в формирование годовой коллективной дозы облучения населения, которая составляет 2,7 - 3,1 чел.-мЗв при утечке 1 Бк/с в течение 100 - 10000 лет [5]. ^{129}I также может создавать наибольшую ожидаемую эффективную дозу облучения европейского населения в 5-км зоне атмосферных выбросов по сравнению с другими техногенными гамма- и бета-излучающими радионуклидами, равную $5,6\cdot 10^{-10}$ Зв на сотый год при утечке 1 Бк/с [5].

В случае загрязнения пастбищной растительности и рациона коров радиоактивными изотопами йода «молочный» путь его поступления (в первую очередь ^{131}I) в организм обуславливает больше 90 % поглощенной дозы облучения щитовидной железы человека. Анализ содержания долгоживущего ^{129}I в почвах и компонентах рациона животных и человека является лучшим методом ретроспективной дозиметрии радиационного воздействия короткоживущего ^{131}I , образовавшегося после Чернобыльской и Фукусимской аварий, поскольку физико-химические свойства обоих радионуклидов практически идентичны [6, 7]. Таким образом, прогнозирование содержания радиоизотопов йода в компонентах рациона является важным этапом радиационной защиты на основании оценки содержания йода в молоке коров в различных агроландшафтных условиях.

© Ю. В. Хомутинин, В. А. Кашпаров, Л. Н. Отрешко, Л. В. Йошенко, 2017

Материалы и методы исследований

В данной работе материалом для анализа были результаты исследований, проведенных авторами в 2014 - 2017 гг. в рамках изучения биогенной миграции ^{127}I в различных почвенно-ландшафтных условиях континентальной Украины. Эти результаты были дополнены данными по содержанию изотопов ^{127}I и ^{129}I в почвенных профилях, полученными различными авторами на территориях Украины, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС.

В рамках международной программы по реконструкции дозовых нагрузок на щитовидную железу человека, обусловленных ^{131}I , в 1995 - 1999 гг. на территории Житомирской области были проведены детальные исследования распределения изотопов ^{127}I и ^{129}I по глубине почвенных профилей [8, 9]. Были отобраны 42 почвенных профиля в окрестностях различных населенных пунктов Коростенского и Народичевского районов (зоны II и III) и Житомира (зона IV) на глубину 40 см. В 1994 - 1995 гг. и в 2001 г. в рамках исследований по ретроспективной оценке плотности выпадений ^{131}I и дозы на щитовидную железу были проведены исследования по изучению содержания ^{129}I и отношения $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ в почве в различных местах 30-км зоны ЧАЭС [10]. Пробы почвы отбирались на глубину 20 см в окрестностях населенных пунктов Копачи (Ш-51.3452°, Д-30.1338°), Дитятки (Ш-51.1205°, Д-30.1735°), Чистоголовка (Ш-51.3531°, Д-30.0283°), Буряковка (Ш-51.3531°, Д-30.0283°), а также на левобережной пойме р. Припять вблизи оз. Глубокое (Ш-51.4067°, Д-30.0717°). В работе изучалось распределение ^{129}I в верхнем слое почвы и его миграция в более глубокие горизонты, а также сопоставление результатов с ^{127}I [11]. В рамках этой работы в 2006 г. в окрестностях населенных пунктов Долгий Лес (Ш-51.3841°, Д-29.8781°), Журба (Ш-51.4222°, Д-29.1611°) и Христиновка (Ш-51.3194°, Д-29.2889°) Народичевского района были послойно отобраны почвенные профили на глубину 2 м, в которых определялось содержание ^{127}I и ^{129}I .

Средняя погрешность определения содержания ^{127}I и ^{129}I в почве в приведенных выше исследованиях составляла около 9 %. В этих работах отмечено, что распределение изотопов йода в почве имеет свои особенности. Отмечаются значительные различия между распределениями ^{127}I и ^{129}I в одном и том же профиле необрабатываемой почвы. ^{127}I в целом более равномерно распределен по корнеобитаемому слою почвы. Техногенный ^{129}I сосредоточен в верхних горизонтах почвы, в основном в 20-см слое. В пахотном слое

почвы распределения ^{127}I и ^{129}I близки к равномерным.

В 2014 - 2017 гг. в УкрНИИСХР проводились исследования по изучению биогенной миграции ^{127}I в различных почвенно-ландшафтных условиях континентальной Украины. С целью сопоставления результатов с ранее проведенными исследованиями [8 - 11] часть тестовых площадок была выбрана в тех же местах, где проводились указанные исследования (Житомирская область – окрестности населенных пунктов Левков, Вороново, Христиновка, Ноздрище; 30-км зона ЧАЭС – Дитятки, Копачи, оз. Глубокое). Тестовые площадки в Житомирской области включали сенокос и пастбища, в 30-км зоне ЧАЭС – луговое разнотравье. На каждой тестовой площадке были отобраны сопряженные пробы «почва - растения» на пробной площадке площадью не более 1 м², в которых определялось удельное содержание ^{127}I . Для определения йода в образцах использовался инверсионный вольтамперометрический метод (измерение проводилось на анализаторе ТА-4) [12]. Статистическая относительная погрешность измерения содержания ^{127}I в образцах обследуемых объектов (погрешность метода) первыми двумя методами на уровне 2σ не превышала 15 - 25 %, а третьим методом – 22 % при доверительной вероятности 0,95.

Значения коэффициентов накопления (*KH*) – отношение концентрации йода в растении к его средней концентрации в поверхностном слое почвы – определялось для 20-см слоя почвы на пахотных угодьях и для 10-см слоя почвы на лугах и пастбищах согласно рекомендациям МАГАТЭ [14].

Для обработки результатов и оценки статистических характеристик случайных величин были использованы методы статистического анализа [13].

Особенности корневого поступления изотопов йода в растения

Поступление йода в растения происходит из двух источников. Первый источник – почва: поступление происходит в основном через корневую систему растений, также частично через листья и стебли вследствие их запыления и загрязнения при разбрызгивании. Второй источник – атмосфера: поступление происходит через листья и стебли вследствие сухого и мокрого осаждения йода из атмосферы. Этот источник наиболее значимый в прибрежных районах морей и океанов. В данной работе рассматривается только корневое поступление йода в луговые растения (луговое разнотравье, сено), являющиеся

ся основным компонентом рациона питания коров в пастбищный период. Это характерно для различных агроландшафтных условий континентальной Украины.

При прогнозировании корневого поступления изотопов различных элементов в растения в основном используют два подхода [14 - 16]. В основе первого лежит KH – отношение средней концентрации изотопа в растении (или его части) к его средней концентрации в поверхностном слое почвы (20-см слой для пахотных угодий и 10-см для естественной пастбищной растительности). В растения йод поступает из всего корнеобитаемого слоя почвы, а средняя концентрация его измеряется, как правило, только в поверхностном слое (20-см слой для пахотных угодий и 10-см для лугов и пастбищ). Прогнозирование корневого поступления изотопов йода в растения корректно, когда весь йод и вся корневая система растений сосредоточены в указанном поверхностном слое либо же изотопы йода или корни растений равномерно распределены по корнеобитаемому слою почвы. Если же эти условия не выполнены (на практике так оно и есть), то KH становится величиной условной, зависящей от глубины усреднения концентрации йода. Результаты имеющихся исследований показывают (например, [8 - 11]), что в одном и том же профиле почвы концентрация ¹²⁷I и ¹²⁹I имеет свое распределение по глубине. Поэтому для корректного прогнозирования корневого поступления этих изотопов йода в растения на основе условного коэффициента перехода его необходимо в общем случае определить для каждого изотопа. Однако в доступной нам справочной литературе, рекомендованной МАГАТЕ (напри-

мер, [14, 15]), значения KH^I считаются одинаковыми для всех изотопов йода. На практике в первом приближении это будет справедливо только для растений, которые выращиваются на ежегодно обрабатываемой почве (пахотные угодья). Для лугового разнотравья это допущение будет справедливо, когда в результате вертикальной миграции установится квазиравномерное распределение изотопов ¹²⁷I и ¹²⁹I в корнеобитаемом слое почвы. Литературные данные [8 - 11] показывают, что это в первом приближении выполняется для ¹²⁷I.

В основе другого подхода лежит коэффициент перехода ($KП$) – отношение средней концентрации изотопа в растении (или его части) к его плотности выпадения на поверхность почвы. Он также имеет свои плюсы и минусы. Хорошие оценки корневого поступления изотопов йода в растения получаются тогда, когда вся масса выпавшего изотопа сосредоточена в корнеобитаемом слое почвы. Если в результате вертикальной миграции часть изотопа переместилась ниже корнеобитаемого слоя, то получим завышенные оценки его содержания в растениях. Практическое определение $KП$ также делает его условной величиной, зависящей от глубины отбора проб почвы при оценке плотности выпадения изотопа.

В работах [17 - 19] показано, что наблюдаемые усредненные значения KH^{129I} для 30-см поверхностного слоя почвы в целом превосходят соответствующие значения KH^{127I} . На рис. 1 это показано для региона III (окрестности г. Ганновер), наиболее удаленного от моря. Сплошная «жирная» линия соответствует $KH^{129I} = KП^{129I}$.

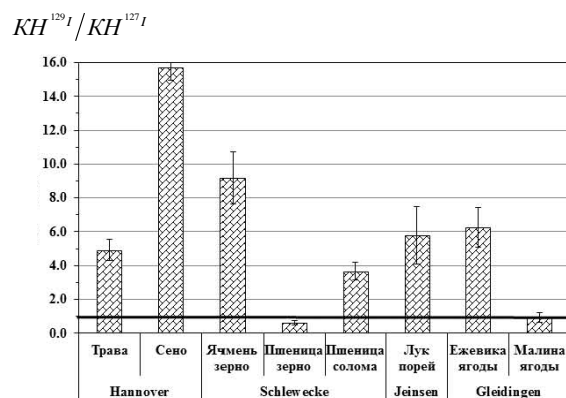
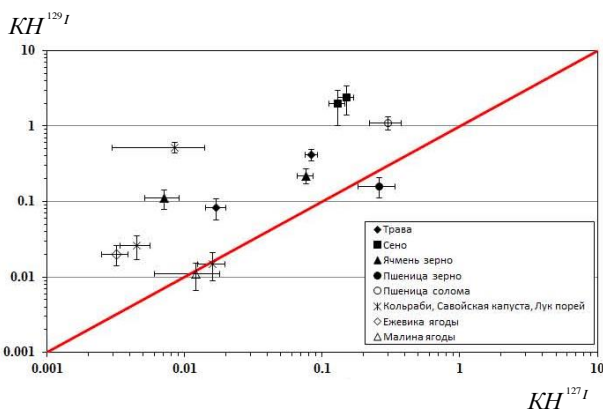


Рис. 1. Соотношение между KH^{129I} и $KП^{129I}$ по данным [19] на 1999 г. (регион III).

Исходя из результатов, приведенных на рис. 1, медиана отношения KH^{129I} / KH^{127I} равна: 8,8 для травы и сена (пастбища и сенокосы); 2,7 для зерновых культур (поля, где пахотный слой регулярно перемешивается).

Причинами более высоких наблюдаемых значений KH^{129I} , чем соответствующие значения KH^{127I} , авторы работы [18] считают поверхностное загрязнение растений изотопами ¹²⁹I вследствие их сухого и мокрого осаждения и возмож-

ную более высокую доступность ^{129}I . Однако на рис. 1 из отношения $KH^{129}\text{I}/KH^{127}\text{I}$ видно, что названные выше причины не полностью объясняют наблюдаемое различие в коэффициентах накопления ^{127}I и ^{129}I , что особенно ярко проявилось на ежевике и малине, произрастающих в одном месте и в одних и тех же условиях. По нашему мнению, одной из возможных причин такого различия может быть различное распределение корней растений по глубине и несовпадение пика этого распределения с пиком распределения ^{129}I в корнеобитаемом слое почвы. Этот вопрос в данной работе нас интересует, прежде всего, в применении к луговому разнотравью. Рассмотрим влияние этого фактора применительно к территории Житомирской области (Коростенский и Народичевский районы), загряз-

ненной радиоактивными выпадениями в результате аварии на ЧАЭС, где в настоящее время сухое и мокрое осаждения изотопов йода практически отсутствуют.

В работах [8, 9, 11] отмечено, что распределение изотопов ^{127}I и ^{129}I в почве имеет свои особенности. Отмечаются значительные различия между их распределениями в одном и том же профиле почвы. ^{127}I в целом более равномерно распределен по корнеобитаемому слою почвы. Техногенный ^{129}I сосредоточен в верхних горизонтах почвы, в основном в 20-см слое. На рис. 2 это показано для трех характерных профилей почвы, отобранных в окрестности сел Долгий Лес, Журба и Христиновка Народичевского района в 2006 г.

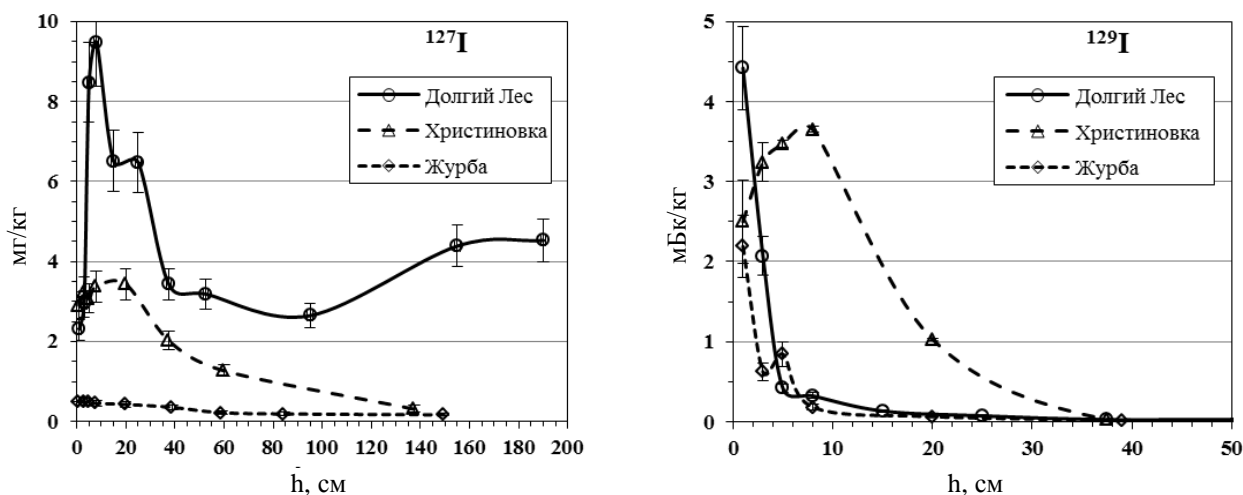


Рис. 2. Распределения ^{127}I и ^{129}I по профилям почвы в Народичевском районе по данным [11] на 2006 г.

На распространение корневой системы растений в почвенном профиле большое влияние оказывают вид растений, тип почвы, ее гранулометрический состав, погодные условия, влажность и способы обработки почвы. Корни растений более интенсивно растут по направлению меньшей плотности, возрастания содержания воды и питательных веществ в почве.

Для описания распределения корней растений по глубине почвы используют различные математические модели [20, 21]. В данной работе мы будем использовать модель [20]

$$q(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^\alpha}, \quad (1)$$

где $q(h)$ – доля корней растения в верхнем слое почвы глубиной h ; h_{50} – глубина верхнего слоя почвы, в котором находится 50 % корневой системы, см; α – параметр модели.

При послойном определении концентрации изотопов йода в почве средняя концентрация его для верхнего слоя почвы глубиной h равна

$$\bar{C}_n(h) = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i \cdot C_n(\Delta x_i)}{h}, \quad (2)$$

где $C_n(\Delta x_i)$ – средняя концентрация йода в слое почвы $\Delta x_i = h_{i+1} - h_i$, мг/кг (Бк/кг). Значения $\bar{C}_n(h)$ для различных мест отбора проб почвы приведены в табл. 1.

Поверхностное удельное содержание изотопа при отборе проб почвы на глубину h ($A_n(h)$, мг/м²; Бк/м²) определялось соотношением

$$A_n(h) = \int_0^{h_{\max}} C_n(x) \cdot \rho(x) \cdot dx - \int_h^{h_{\max}} C_n(x) \cdot \rho(x) \cdot dx, \quad (3)$$

где $C_n(x)$ – концентрации рассматриваемого

изотопа на глубине x , мг/кг (мБк/кг); $\rho(x)$ – удельная плотность почвы на глубине x , кг/м³, значения которой для различных профилей поч-

вы приведены в работах [8, 9, 11]. Значения $A_n(h)$ для различных мест отбора проб почвы, взятые из указанных работ, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Оценки массового и поверхностного удельного содержания изотопов йода в поверхностных 10- и 20-см слоях почвы по данным [8, 9, 11]

Село	$\bar{C}_n(10)$		$\bar{C}_n(20)$		$A_n(10)$		$A_n(20)$	
	¹²⁷ I, мг/кг	¹²⁹ I, мБк/кг	¹²⁷ I, мг/кг	¹²⁹ I, мБк/кг	¹²⁷ I, г/м ²	¹²⁹ I, Бк/м ²	¹²⁷ I, г/м ²	¹²⁹ I, Бк/м ²
Долгий Лес (2006 г.)	6,54	1,51	6,53	0,82	0,20	0,22	0,35	0,24
Христиновка (2006 г.)	3,19	3,30	3,31	2,17	0,4	0,37	0,9	0,55
Журба (2006 г.)	0,48	0,80	0,46	0,43	0,05	0,15	1,0	1,03
Нимировка (1995 г.)	6,3	1,26	6,6	0,7	0,5	0,13	1,5	0,15
Ноздрище (1995 г.)	0,56	1,71	0,58	3,14	0,15	0,2	0,25	1,06

Поступление изотопов йода в растение через корневую систему происходит из различных слоев почвы и зависит от степени развития активной части корневой системы, представленной молодыми растущими корешками. Полагаем, что изотопы ¹²⁷I и ¹²⁹I в первом приближении во всех слоях почвы находятся в одних и тех же физико-химических формах, а поглощательная способность корешков не зависит от места и глубины их расположения. Отсюда количество поступившего в растение йода из элементарного слоя почвы толщиной dx будет равно

$$dC_p = k_I \cdot f(x) \cdot C_n(x) \cdot dx, \quad (4)$$

где $C_n(x)$ – концентрация йода в слое dx , мг/кг (Бк/кг); $f(x)$ – плотность распределения активной части корневой системы по корнеобитаемому слою почвы; k_I – некоторый коэффициент пропорциональности (коэффициент накопления из элементарного слоя почвы), который в силу сделанных выше допущений будет одинаковым для ¹²⁷I и ¹²⁹I. При равномерном распределении йода в корнеобитаемом слое почвы $k_I = KH^I$. Таким образом, удельные содержания изотопов йода в растении определяются как

$$C_p^{127} = k_I \cdot \int_0^{h_{\max}} f(x) \cdot C_n^{127}(x) \cdot dx,$$

$$C_p^{129} = k_I \cdot \int_0^{h_{\max}} f(x) \cdot C_n^{129}(x) \cdot dx. \quad (5)$$

Плотность распределения активной части корневой системы по корнеобитаемому слою почвы, как правило, неизвестна. В лучшем случае известна оценка распределения доли общей корневой системы по глубине почвы. В данной работе в первом приближении будем считать, что распределение активной части корневой системы растений по корнеобитаемому слою почвы пропорционально распределению доли общей корневой системы. Используя данные по распределению изотопов ¹²⁷I и ¹²⁹I по профилям почвы в окрестностях сел Житомирской области (см. табл. 1) и модель (1), оценим величину отношений KH^{129I}/KH^{127I} и $KП^{129I}/KП^{127I}$. С учетом изложенного выше эти отношения имеют вид

$$\frac{KH^{129I}}{KH^{127I}} = \left(\frac{C_p^{129}}{C_p^{127}} \right) \cdot \left(\frac{\bar{C}_n^{127}(h)}{\bar{C}_n^{129}(h)} \right);$$

$$\frac{KП^{129I}}{KП^{127I}} = \left(\frac{C_p^{129}}{C_p^{127}} \right) \cdot \left(\frac{A_n^{127}(h)}{A_n^{129}(h)} \right). \quad (6)$$

В табл. 2 приведены значения этих отношений для различных глубин отбора проб почвы при определении среднего содержания изотопов ¹²⁹I и ¹²⁷I в поверхностном слое $\bar{C}_n(h)$ в предположении, что на этих участках растет характерный представитель рациона коров – овсяница (*Festuca pratensis*) ($h_{50} = 12,8$; $\alpha = 1,144$).

Таблица 2. Соотношение характеристик накопления ¹²⁹I и ¹²⁷I для овсяницы

Село	C_p^{129} / C_p^{127} , мБк/мг	KH^{129I} / KH^{127I}		$KП^{129I} / KП^{127I}$	
		h = 10	h = 20	h = 10	h = 20
Долгий Лес	0,32·1,08 ^{±1}	1,39·1,12 ^{±1}	2,55·1,12 ^{±1}	0,29·1,16 ^{±1}	0,47·1,16 ^{±1}
Христиновка	0,93·1,06 ^{±1}	0,90·1,09 ^{±1}	1,42·1,09 ^{±1}	1,01·1,18 ^{±1}	1,52·1,18 ^{±1}
Журба	1,96·1,37 ^{±1}	1,18·1,38 ^{±1}	2,10·1,38 ^{±1}	0,65·1,41 ^{±1}	1,90·1,41 ^{±1}
Нимировка	0,21·1,06 ^{±1}	1,05·1,09 ^{±1}	1,98·1,09 ^{±1}	0,81·1,16 ^{±1}	2,10·1,16 ^{±1}
Ноздрище	3,42·1,10 ^{±1}	1,12·1,12 ^{±1}	0,63·1,12 ^{±1}	2,57·1,19 ^{±1}	0,81·1,19 ^{±1}
Среднее		1,13	1,74	1,06	1,36

Приведенные в табл. 2 результаты показывают, что в период 1995 - 2006 гг. на загрязненных радионуклидами территориях Украины, как и в окрестности г. Ганновер [17 - 19], будет наблюдаться значительное различие между KH^{129I} и KH^{127I} ($KП^{129I}$ и $KП^{127I}$). Со временем, в результате вертикальной миграции, распределение техногенного ^{129}I в профиле почвы будет выравниваться и становиться квазиравномерным аналогично ^{127}I . Тогда $KH^{129I} \cong KH^{127I}$; $KП^{129I} \cong KП^{127I}$. Однако в настоящее время (до 2020 г.) при использовании значений KH^{127I} или $KП^{127I}$ для прогнозирования содержания ^{129}I в луговом разнотравье (сене) для получения консервативных экспресс-оценок этого содержания будем в первом приближении считать, что ^{129}I в два раза более интенсивно поступает в корневую систему растений по сравнению с ^{127}I :

$$KH^{129I} = 2 \cdot KH^{127I}; \quad KП^{129I} = 2 \cdot KП^{127I}. \quad (7)$$

Экспресс-прогнозирование содержания ^{129}I в луговом разнотравье

Для прогнозирования содержания ^{129}I в луговом разнотравье будем использовать модель, основанную на $KП$:

$$C_p^{129I} = KП^{129I} \cdot A_n^{129I}. \quad (8)$$

В настоящей работе KH и $KП$ изотопов йода, удельное содержание их в почве и плотность выпадений будем рассматривать как случайные величины, имеющие логнормальные законы распределения вероятностей

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot X \cdot s} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(X) - \mu}{s} \right)^2}, \quad (9)$$

где X – рассматриваемая величина; μ и s – среднее значение и стандартное отклонение логарифма величины X . Среднее геометрическое величины X равняется $GM = \exp(\mu)$, а стандартное геометрическое отклонение – $GSD = \exp(s)$. Исходя из этого, прогнозируемое содержание ^{129}I в луговом разнотравье (сене) также будет случайной величиной с логнормальным законом распределения вероятностей. Это подтверждается как литературными данными, например [18, 19], так и статистическим анализом собственных результатов УкрНИИСХР.

Значение $KП^{129I}$ с учетом соотношения (7) в первом приближении может быть оценено по формуле

$$KП^{129I} = KH^{129I} \cdot \frac{\Omega}{V \cdot \rho} = 2 \cdot KH^{127I} \cdot \frac{\Omega}{V \cdot \rho}, \quad (10)$$

где V – объем почвы, в котором оценено среднее значение концентрации ^{129}I ; ρ – плотность почвы в этом объеме; Ω – единица площади, для которой оценено A_n^{129I} . В нашем случае для лугов и пастбищ $\Omega = 1 \text{ м}^2$, $V = 0,1 \text{ м}^3$, значение ρ для дальнейших расчетов в первом приближении будем считать 1500 кг/м^3 . Отсюда

$$KП^{129I}(10) = 2 \cdot KH^{127I}(10) / 150, \text{ (мБк/кг)/(мБк/м}^2\text{)}. \quad (11)$$

В табл. 3 приведены оценки GM и GSD для коэффициентов накопления ^{127}I , полученные для лугового разнотравья в пастбищный период на дерново-подзолистых почвах в окрестностях некоторых сел Житомирской области (II и III зоны). Поскольку $KП^{129I}$ пропорционален KH^{127I} , то их статистические характеристики вариативности GSD будут равны.

Таблица 3. Статистические характеристики KH^{129I} в луговом разнотравье

Село, тип почвы	KH^{127I}	
	GM	GSD
Воронево, Коростенский район, дерново-слабоподзолистая супесчаная	0,44	1,5
Христиновка, Народичевский район, дерново-слабоподзолистая песчаная	0,43	2,04
Поздрище, Народичевский район, дерново-слабоподзолистая песчаная	0,28	2,48
Среднее значение	0,38	2,0

Как уже отмечалось, прогнозирование содержания ^{129}I в луговом разнотравье актуально в Украине только для территорий, подвергшихся радиоактивным выпадениям в результате аварии на ЧАЭС. В работе [9] показано, что в северных районах Житомирской и Киевской областей наблюдается корреляционная зависимость между плотностями выпадений ^{129}I и ^{137}Cs . На основе анализа, обобщения и последующей статистической обработки, приведенных в работах [9 - 11, 22] результатов, была оценена зависимость между плотностями выпадений ^{137}Cs (A_n^{137Cs} , кБк/м²) и ^{129}I (A_n^{129I} , мБк/м²) для загрязненных радионуклидами территорий Житомирской области (Народичевский и Коростенский районы) и чернобильской зоны отчуждения. При этом по аналогии с работой [9] результаты измерения ^{137}Cs , полученные в 2001 г. [10] и в 2006 г. [11] с учетом радиоактивного распада, были пересчитаны на момент выпадений (26.04 - 06.05 1986 г.). Ре-

зультаты показаны на рис. 3. Полученное соотношение между плотностями выпадений ¹³⁷Cs и ¹²⁹I на 1986 г. имеет вид

$$A_n^{129I} = a \cdot (A_n^{137Cs})^b, \quad (12)$$

где $a = \exp(0,67 \pm 0,2)$; $b = 0,72 \pm 0,03$. Коэффициент корреляции $r = 0,91$, а остаточное геометрическое отклонение $GSD_{ocm} = 1,47$.

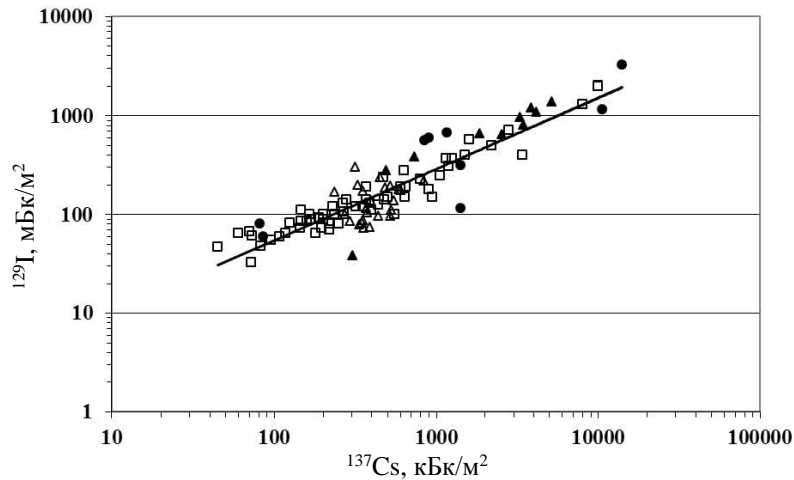


Рис. 3. Соотношение между плотностями выпадений ¹³⁷Cs и ¹²⁹I для территорий, загрязненных чернобыльскими радиоактивными выпадениями, в пересчете на 2017 г.: □ – Житомирская область по данным [22]; Δ – II зона, Коростенский район по данным [9]; ▲ – III зона, Народичевский район по данным [9, 11]; ● – чернобыльская зона отчуждения по данным [10].

Таким образом, учитывая соотношения (11) и (12), вероятностная модель для экспресс-прогнозирования содержания ¹²⁹I в луговом разнотравье (сене) будет иметь вид

$$C_p^{129I} = \frac{2 \cdot KH^{129I}(10)}{150} \cdot a \cdot (A_n^{137Cs})^b. \quad (13)$$

При этом плотность выпадения ¹³⁷Cs (A_n^{137Cs} , kBq/m²) с учетом радиоактивного распада должна быть пересчитана на начало мая 1986 г.

В табл. 4 и на рис. 4 приведены прогнозные экспресс-оценки удельного содержания ¹²⁹I в

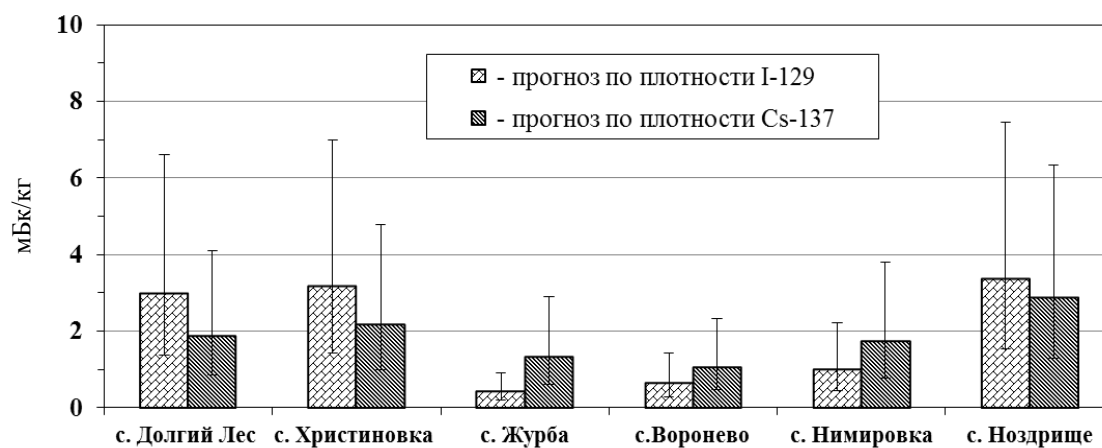
луговом разнотравье в расчете на воздушно-сухую массу (сено) для прилегающих территорий характерных населенных пунктов Житомирской области, загрязненных радиоактивными выпадениями в результате аварии на ЧАЭС (II и III зоны). При проведении расчетов для сел Христиновка, Воронево, Ноздрище *KH* брались фактические (см. табл. 3), для сел Долгий Лес, Журба, Нимировка – усредненное значение. Значение *GSD* во всех случаях принималось равным 1,6 (усредненная величина). Эти оценки будут справедливы до тех пор, пока основная масса ¹²⁹I будет находиться в почве в корнеобитаемом слое лугового разнотравья.

Таблица 4. Прогнозные экспресс-оценки удельного содержания ¹²⁹I в луговом разнотравье

Село	Удельная активность в почве ¹²⁹ I, МБк/кг	Плотность загрязнения почвы ¹³⁷ Cs, kBq/m ² в пересчете на 1986 г.	Прогноз содержания ¹²⁹ I в луговом разнотравье, МБк/кг	
			по плотности ¹²⁹ I	по плотности ¹³⁷ Cs
Долгий Лес	281 (2006 г.)	497	3,0·1,83 ^{±1}	1,6·1,83 ^{±1}
Христиновка	660 (2006 г.)	1869	3,2·1,83 ^{±1}	2,2·1,83 ^{±1}
Журба	38,5 (2006 г.)	309	0,41·1,83 ^{±1}	1,3·1,83 ^{±1}
Воронево	109 (1995 г.)	516	0,64·1,83 ^{±1}	1,1·1,83 ^{±1}
Нимировка	94 (1995 г.)	447	1,0·1,83 ^{±1}	1,7·1,83 ^{±1}
Ноздрище	905 (1995 г.)	3908	19,2·1,83 ^{±1}	16,3·1,83 ^{±1}

Сопоставление прогнозных оценок содержания ¹²⁹I в луговом разнотравье, полученных на основе плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs (соотношение (12)) и на основе прямых оценок плотности выпадений ¹²⁹I (см. рис. 4), показывает их хорошее совпадение.

Одной из основ предложенного подхода к прогнозированию накопления изотопов ¹²⁹I в луговом разнотравье (сене) является вероятностное представление о его плотности выпадений на пастбищах, лугах, сенокосах и вероятностном распределении возможных значений *KП*.

Рис. 4. Прогнозные экспресс-оценки содержания ^{129}I в луговом разнотравье.

Для корректного понимания результатов такого прогноза необходимо использовать как медианное значение прогнозируемого содержания ^{129}I в растениях (GM), так и соответствующие интервальные границы, между которыми находится заданная доля возможных значений $C_p^{129\text{I}}$. Изложенный подход позволяет также оценивать вероятности превышения (или не превышения) установленных (требуемых) значений для $C_p^{129\text{I}}$. Например, возможные прогнозные значения (модель (13)) удельного содержания ^{129}I в луговом разнотравье в расчете на воздушно-сухую массу (сено) для прилегающих территорий с. Христиновка с вероятностью 90 % находится в интервале (1,6 - 10,1) мБк/кг.

Заключение

На основе корреляционной зависимости между плотностями выпадений ^{129}I и ^{137}Cs и вероятностного подхода к описанию плотности выпадений ^{129}I и возможных значений коэффициентов перехода предложена методика прогнозирования содержания этого изотопа в луговом разнотравье для территорий, загрязненных радиоактивными выпадениями в результате аварии на ЧАЭС. Для

ее практической реализации оценены статистические характеристики содержания ^{127}I в почве, луговом разнотравье и соответствующие коэффициенты накопления в окрестностях характерных населенных пунктов Житомирской области II и III зон.

На основе статистического анализа литературных данных по плотности выпадений ^{137}Cs и ^{129}I на загрязненных радионуклидами территориях Житомирской области (Народичевский и Коростенский районы) и 30-км зоны отчуждения ЧАЭС оценена зависимость между этими плотностями на момент радиоактивных выпадений (1986 г.).

Предложенная методика реализована в виде экспресс-метода прогноза содержания ^{129}I в луговом разнотравье без непосредственных измерений его в почве. Она позволяет оценить не только точечные оценки содержания ^{129}I в луговом разнотравье (сене), но и интервальные оценки с заданным пользователем уровнем доверия, а также оценивать вероятности превышения (или не превышения) установленных (требуемых) значений для территорий, загрязненных радиоактивными выпадениями в результате аварии на ЧАЭС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Aldahan, V. Alfimov, G. Possnert ^{129}I anthropogenic budget: major sources and sinks. *Appl. Geochem.* 22 (2007) 606.
2. X. Hou et al. Iodine-129 in seawater offshore Fukushima: distribution, inorganic speciation, sources, and budget. *Environ. Sci. Technol.* 47 (2013) 3091.
3. M. Hoshi, M. Yamamoto, H. Kawamura et al. Fallout radioactivity in soil and food samples in Ukraine: measurements of iodine, plutonium, cesium, and strontium isotopes. *Health Phys.* 67(2) (1994) 187.
4. S. Szidat et al. Iodine-129: sample preparation, quality control and analyses of pre-nuclear materials and natural waters from Lower Saxony, Germany. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 172 (2000) 699.
5. Sources, effects and risks of ionizing radiation. *UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes.* (New York, United Nations, 2017) 512 p.
6. R. Michel et al. Retrospective dosimetry of Iodine-131 exposures using Iodine-129 and Caesium-137 inventories in soils - A critical evaluation of the consequences of the Chernobyl accident in parts of Northern Ukraine. *Journal of Environmental Radioactivity* 150 (2015) 20.
7. Y. Muramatsu et al. Analysis of ^{129}I in the soils of

- Fukushima Prefecture: preliminary reconstruction of ¹³¹I deposition related to the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP). *Journal of Environmental Radioactivity* 139 (2015) 344.
8. A. Schmidt. ¹²⁹I und stabiles Iod in Umweltproben: Qualitätskontrolle von Analysemethoden zur Radioökologie und zur retrospektiven Dosimetrie (in German). Ph.D. thesis. (Germany, University of Hannover, 1998) 232 p.
 9. R. Michel et al. Iodine-129 in Soils from Northern Ukraine and the Retrospective Dosimetry of the Iodine-131 Exposure after the Chernobyl Accident. *Sci. Total Environ.* 340(1 - 3) (2005) 35.
 10. S. K. Sahoo et al. Determination of ¹²⁹I and ¹²⁷I Concentration in Soil Samples from the Chernobyl 30-km Zone by AMS and ICP-MS. *Journal of Radiation Research* 50 (2009) 325.
 11. J. Korntheuer. Analytik von ¹²⁷I und ¹²⁹I in Umweltproben. Der Diplomprüfung im Fach Chemie an der Johannes Gutenberg Universität Mainz, 2009. 72 p.
 12. Методика выполнения измерений содержания йода в пищевых продуктах, продовольственном сырье, кормах и продуктах их переработки, лекарственных препаратах, витаминах, БАДах, биологических объектах методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА (МУ 31-07/04) (Томск, 2004) 20 с.
 13. А. Афифи, С. Эйзен. *Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ* (М.: Мир, 1992) 488 с.
 14. *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments* (Vienna: IAEA-TRS-472, 2010) 194 p.
 15. *Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments* (Vienna: IAEA, 2009) 622 p.
 16. Б.С. Пристер и др. *Основы сельскохозяйственной радиологии* (К.: Урожай, 1991) 474 с.
 17. K. Klipsch. *Bestimmung von ¹²⁹I und ¹²⁷I in Umweltproben zwecks der Ermittlung radioökologischer Parameter des ¹²⁹I auf seinem Weg von Quellen durch die Nahrungskette bis zum Menschen* (Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie, Universität Hannover, 2005) 182 p.
 18. Th. Ernst. *Anthropogenes Iod-129 als Tracer für Umweltprozesse: Ein Beitrag zum Verhalten von Spurenstoffen bei der Migration in Böden und beim atmosphärischen Transport. Dissertation von Doktor der Naturwissenschaften.* (Hannover, 2003) 365 p.
 19. R. Michel et al. *Ableitung von Radioökologischen Parametern aus dem Langfristigen Eintrag von Iod-129* (Hannover, 2004) 231 p.
 20. J. Fan et al. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Research* 189 (2016) 68.
 21. H.J. Schenk, R.B. Jackson. The global biogeography of roots. *Ecological Monographs* 72(3) (2002) 311.
 22. R. Michel. *Iodine-129 and Iodine-127 in the European Environment* (2011, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz Leibniz Universität Hannover).

Ю. В. Хомутинін*, В. О. Кашпаров, Л. М. Отрешко, Л. В. Йощенко

*Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології
НУБіП України, Київ, Україна*

*Відповідальний автор: khomutinin@gmail.com

ПРОГНОЗУВАННЯ ВМІСТУ ¹²⁹I У ЛУГОВОМУ РІЗНОТРАВ'І ПАСОВИЩ КОРОСТЕНСЬКОГО ТА НАРОДИЧІВСЬКОГО РАЙОНІВ

На підставі ймовірного підходу до опису можливих значень коефіцієнтів переходу і вмісту ¹²⁹I у ґрунті і рослинах для територій, забруднених чорнобильськими радіоактивними випадіннями, запропонована методологія та експрес-метод прогнозування вмісту ¹²⁹I у луговому різнотрав'ї без безпосередніх вимірювань його у ґрунті.

Ключові слова: ізотопи йоду ¹²⁷I і ¹²⁹I, біогенні потоки, міграція, лугове різнотрав'я, прогноз, коефіцієнт накопичення.

Yu. V. Khomutinin*, V. O. Kashparov, L. M. Otreshko, L. V. Yoshchenko

Ukrainian Institute of Agricultural Radiology NUBiP of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: khomutinin@gmail.com

¹²⁹I CONTENT FORECASTING IN THE MEADOW MOTLEY GRASS OF KOROSTEN AND NARODICHI DISTRICTS PASTURES

Based on the probabilistic approach for describing the possible values of the transition coefficients and the content of ¹²⁹I in soil and plants for areas contaminated by Chernobyl radioactive fallouts, a methodology and express-method for predicting ¹²⁹I content in meadow motley grass without direct measurements in the soil is proposed.

Keywords: iodine isotopes ¹²⁷I and ¹²⁹I, biogenic flows, migration, meadow motley grass, forecast, accumulation coefficient.

REFERENCES

1. A. Aldahan, V. Alfimov, G. Possnert. ^{129}I anthropogenic budget: major sources and sinks. *Appl. Geochem.* 22 (2007) 606.
2. X. Hou et al. Iodine-129 in seawater offshore Fukushima: distribution, inorganic speciation, sources, and budget. *Environ. Sci. Technol.* 47 (2013) 3091.
3. M. Hoshi, M. Yamamoto, H. Kawamura et al. Fallout radioactivity in soil and food samples in Ukraine: measurements of iodine, plutonium, cesium, and strontium isotopes. *Health Phys.* 67(2) (1994) 187.
4. S. Szidat et al. Iodine-129: sample preparation, quality control and analyses of pre-nuclear materials and natural waters from Lower Saxony, Germany. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 172 (2000) 699.
5. Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. (New York, United Nations, 2017) 512 p.
6. R. Michel et al. Retrospective dosimetry of Iodine-131 exposures using Iodine-129 and Caesium-137 inventories in soils - A critical evaluation of the consequences of the Chernobyl accident in parts of Northern Ukraine. *Journal of Environmental Radioactivity* 150 (2015) 20.
7. Y. Muramatsu et al. Analysis of ^{129}I in the soils of Fukushima Prefecture: preliminary reconstruction of ^{131}I deposition related to the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP). *Journal of Environmental Radioactivity* 139 (2015) 344.
8. A. Schmidt. ^{129}I und stabiles Iod in Umweltproben: Qualitätskontrolle von Analysenmethoden zur Radioökologie und zur retrospektiven Dosimetrie (in German). Ph.D. thesis. (Germany, University of Hannover, 1998) 232 p.
9. R. Michel et al. Iodine-129 in Soils from Northern Ukraine and the Retrospective Dosimetry of the Iodine-131 Exposure after the Chernobyl Accident. *Sci. Total Environ.* 340(1 - 3) (2005) 35.
10. S. K. Sahoo et al. Determination of ^{129}I and ^{127}I Concentration in Soil Samples from the Chernobyl 30-km Zone by AMS and ICP-MS. *Journal of Radiation Research* 50 (2009) 325.
11. J. Korntheuer. Analytik von ^{127}I und ^{129}I in Umweltproben. Der Diplomprüfung im Fach Chemie an der Johannes Gutenberg Universität Mainz, 2009. 72 p.
12. Method of measuring iodine content in food products, food raw materials, feed and products of their processing, medicinal preparations, vitamins, dietary supplements, biological objects by the method of inversion voltammetry on the TA (MY 31-07/04) type analyzers (Tomsk, 2004) 20 p. (Rus)
13. A. Afifi, S. Ejzen. *Statistical analysis. Approach by using a computer* (Moskva: Mir, 1992) 488 p. (Rus)
14. *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments* (Vienna: IAEA-TRS-472, 2010) 194 p.
15. *Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments* (Vienna: IAEA, 2009) 622 p.
16. B.S. Prister et al. *Fundamentals of Agricultural Radiology* (Kyiv: Urozhaj, 1991) 474 p. (Rus)
17. K. Klipsch. *Bestimmung von ^{129}I und ^{127}I in Umweltproben zwecks der Ermittlung radioökologischer Parameter des ^{129}I auf seinem Weg von Quellen durch die Nahrungskette bis zum Menschen* (Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie, Universität Hannover, 2005) 182 p.
18. Th. Ernst. Anthropogenes Iod-129 als Tracer für Umweltprozesse: Ein Beitrag zum Verhalten von Spurenstoffen bei der Migration in Böden und beim atmosphärischen Transport. Dissertation von Doktor der Naturwissenschaften. (Hannover, 2003) 365 p.
19. R. Michel et al. *Ableitung von Radioökologischen Parametern aus dem Langfristigen Eintrag von Iod-129* (Hannover, 2004) 231 p.
20. J. Fan et al. Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Research* 189 (2016) 68.
21. H.J. Schenk, R.B. Jackson. The global biogeography of roots. *Ecological Monographs* 72(3) (2002) 311.
22. R. Michel. *Iodine-129 and Iodine-127 in the European Environment* (2011, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz Leibniz Universität Hannover).

Надійшла 03.10.2017

Received 03.10.2017