

УДК 51-76, 519.2, 631.95

ВЕРОЯТНОСТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ^{129}I В МОЛОКЕ КОРОВ

Ю. В. Хомутинин, В. А. Кашпаров, Н. М. Лазарев, Л. Н. Отрешко, Л. В. Йошенко

e-mail: khomutinin@gmail.com

Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии

НУБиП Украины,

ул. Машиностроителей, 7, пгт Киево-святошинский р-н, Чабаны, Украина, 08162

Данная работа завершает 5-летний цикл исследований по оценке основных биогенных потоков ^{127}I и ^{129}I в типичных агроэкосистемах Украины, которые проводились в УкрНИИСХР Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. Одним из основных источников поступления изотопов йода в организм человека является молоко коров. Для прогнозирования содержания изотопов йода в молоке требуется определить их содержание в компонентах суточного рациона (воде, траве, сене, зерне и его производных). В данной работе на основании вероятностного подхода к описанию удельного содержания изотопов ^{129}I в почве, растениях и возможных значений его коэффициентов накопления (перехода) предложена, реализована и апробирована на примере Народичского района Житомирской области методология прогнозирования удельной активности ^{129}I в молоке коров без непосредственного измерения его в почве и растительных компонентах рациона. Для практической реализации предложенной методологии были оценены статистические характеристики коэффициентов накопления ^{127}I в луговом разнотравье, картофеле, соломе (овес, пшеница) и коэффициентов перехода йода из суточного рациона в молоко коров в различных населенных пунктах континентальной Украины. Область исследований охватывает как площади, подвергшейся значительному радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС, так и относительно «чистые» территории. Предложенная методология позволяет получать не только точечные оценки содержания ^{129}I в молоке коров, но и интервальные оценки с заданным пользователем уровнем доверия, а также оценивать вероятности превышения установленных нормативов этого содержания. Предложен и апробирован приближенный экспресс-метод вероятностного прогнозирования удельного содержания ^{129}I в молоке коров в населенном пункте. Он позволяет значительно упростить процесс вероятностного прогнозирования, ограничившись только средствами электронных таблиц EXCEL, минуя методы и алгоритмы статистического моделирования.

Ключові слова: *вероятностное прогнозирование, ^{129}I в молоке коров, риск превышения установленных нормативов.*

Постановка проблемы

Молоко коров является одним из основных источников поступления изотопов йода в организм человека. Содержание изотопов йода в молоке определяется его содержанием в компонентах суточного рациона (воде, траве, сене, зерне и его производных).

В результате аварии на Чернобыльской АЭС наибольшему загрязнению радиоизотопами йода в Украине подверглась территория Полесья, являющаяся эндемичной по содержанию стабильного йода (^{127}I). Низкое содержание ^{127}I в рационе питания населения, включая молоко, на этой территории усилило последствия облучения ^{131}I щитовидной железы человека. «Молочный» путь поступления ^{131}I в организм обуславливает больше 90% поглощенной дозы облучения щитовидной железы человека. Долгоживущий изотоп ^{129}I имеет период полураспада 15,7 млн лет. Он может оказывать существенное влияние

на изменение радиологической обстановки на Земле и формирование коллективной дозы облучения человека в течение больших временных интервалов. В Украине прогнозирование содержания ^{129}I в молоке коров актуально только для территорий, загрязненных черныбыльскими радиоактивными выпадениями.

Анализ последних исследований и публикаций

В УкрНИИСХР Национального университета биоресурсов и природопользования Украины в течение 5 лет (2014–2018 гг.) проводились исследования по оценке основных биогенных потоков ^{127}I и ^{129}I в типичных агроэкосистемах Украины. По результатам этих исследований был опубликован цикл работ [1–3]. Данная работа завершает этот цикл. В ней окончательно сформулирована и реализована методология вероятностного прогнозирования содержания ^{129}I в молоке коров

без непосредственных измерений его в почве и в компонентах суточного рациона, а также проведена ее практическая апробация на примере Народичского района Житомирской области.

Цель, задачи и методика исследований

Объектом исследования являлось прогнозирование удельного содержания ^{129}I в молоке коров без непосредственных измерений содержания ^{129}I в почве, воде и растениях с использованием коэффициентов перехода ^{127}I и плотности выпадений ^{137}Cs .

При фиксированном содержании йода в суточном рационе коровы уже через два–три дня устанавливается равновесная концентрация йода между рационом и молоком коровы [4,5]. Удельное содержание йода в молоке в первом приближении может быть рассчитано по формуле

$$C_m = F_m \cdot \sum_{j=1} P_j \cdot C_j, \quad (1)$$

где P_j – суточное потребление j -ой компоненты рациона коровы, кг/сутки; C_j – удельное содержание (активность) йода в j -ой компоненте рациона коровы, мг/кг (Бк/л); F_m – коэффициент перехода йода из суточного рациона в молоко коровы при постоянном содержании его в рационе, сутки/л.

В прилагаемой методологии вероятностного прогнозирования удельного содержания ^{129}I в молоке коров параметры C_j и F_m рассматриваются как случайные величины. Статистический анализ результатов измерения удельного содержания изотопов йода C_j в различных объектах окружающей среды (почва, сено, солома, зерно, корнеплоды, вода), коэффициентов накопления (KH) и коэффициентов перехода ($KП$) йода из почвы в растения, коэффициентов перехода йода из суточного рациона в молоко коров (F_m) показал, что эти величины являются случайными и описываются логнормальным законом распределения вероятностей

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

где X – рассматриваемая величина; μ и s – среднее значение и стандартное отклонение логарифма величины X . Это подтверждается как

литературными данными [6–8], так и статистическим анализом собственных результатов. Среднее геометрическое величины X (медиана) $GM = \exp(\mu)$, а стандартное геометрическое отклонение – $GSD = \exp(s)$. Коэффициент перехода F_m является одинаковым для всех изотопов йода [9, 10].

В течение 5 лет (2014–2018 гг.) на 21 тестовой площадке, которые расположены в разных почвенно-ландшафтных условиях континентальной Украины, нами были проведены экспериментальные исследования по изучению биогенной миграции ^{127}I в цепи почва-компоненты рациона молоко. Подробные характеристики тестовых площадок приведены в работе [4]. В рамках этих исследований, проводился отбор проб объектов окружающей среды, в которых определялось удельное содержание ^{127}I . Тестовая площадка включала частное хозяйство с коровой, огород, сенокос и пастбище. Пробы отбирались с июня по сентябрь. Сопряженные пробы почва-растение отбирались на пробной площадке площадью не более 1 м^2 . ^{127}I в образцах объектов окружающей среды определялся тремя методами: титриметрическим, спектрофотометрическим и методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторы типа ТА-4 [11, 12]. Погрешность измерения содержания ^{127}I в образцах обследуемых объектов (погрешность метода) первыми двумя методами не превышала 15–25% (на уровне 2σ), а третьим методом – 22% при доверительной вероятности 0,95.

Для обработки результатов измерения использовались методы математической статистики. Полученные оценки различных параметров и их статистические характеристики (наблюдаемая концентрация ^{127}I в поверхностных слоях почвы, удельное содержание ^{127}I в компонентах суточного рациона, в молоке коров, коэффициентов накопления) для различных тестовых площадок в пастбищный период приведены в работе [4]. В таблице 1 приведены усредненные по всем тестовым площадкам значения стандартного геометрического отклонения GSD . Их можно использовать в первом приближении в качестве характеристик вариабельности соответствующих параметров для тех тестовых площадок и населенных пунктов, в которых GSD неопределенно.

Таблица 1. Среднее содержание ^{127}I в компонентах рациона и молоке коров, коэффициенты накопления ^{127}I в растениях по различным тестовым площадкам

№ п.п.	Почва, мг/кг	Вода питьевая, мг/л	Вода водопойная, мг/л	Луговое разнотравье (воздушно-сухая масса)		Комбикорм (зерно)* (воздушно-сухая масса)		Картофель		Молоко мг/л
				мг/кг	КН	мг/кг	КН	мг/кг	КН	
<i>GSD</i>	1,60	1,62	2,55	1,60	1,86	1,53	1,81	1,50	1,82	1,51

В рассматриваемой нами модели вероятностного прогнозирования содержания изотопов йода в молоке коров одним из основных параметров является коэффициент перехода йода из рациона в молоко F_m . Описанные выше результаты мониторинга содержания йода в объектах тестовых площадок позволили рассчитать его статистические характеристики для населенных пунктов, расположенных в различных почвенно-ландшафтных условиях континентальной Украины. В работе [1] приведены эти характеристики, оцененные по первым результатам исследований. В данной работе они уточнены с учетом всех результатов за 2014–2018 годы и охватывают населенные пункты, расположенные как на территории, подвергшейся значительному радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС, так и на относительно «чистых» территориях (табл. 2).

Из представленных в таблице 2 результатов видно, что оценки значений коэффициента перехода ^{127}I (F_m) из суточного рациона в молоко коровы в различных населенных пунктах, расположенных в различных почвенно-ландшафтных условиях Украины, существенно различаются, однако их среднее значение хорошо согласуется со справочными данным МАГАТЕ. Эти оценки справедливы и для ^{129}I . Во всех рассмотренных случаях оценка *GSD* возможных значений коэффициента перехода йода из рациона в молоко коровы меньше, чем в справочных данных МАГАТЕ ($GSD = 2,43$). Использование этих значений при прогнозировании удельного содержания ^{129}I в молоке коров позволит получать менее неопределенные оценки, соответствующие конкретным условиям Украины.

Таблица 2. Статистические характеристики коэффициента перехода йода (F_m) из суточного рациона в молоко коровы

№	Населенный пункт	F_m	№	Населенный пункт	F_m
1	с. Березки	0,0074·1,55 ^{±1}	10	с. Немировка	0,0071·1,7 ^{±1}
2	с. Песчаная	0,0039·1,87 ^{±1}	11	с. Чегири	0,0033·2,1 ^{±1}
3	с. Саварка	0,001·1,82 ^{±1}	12	с. Кулеч	–
4	с. Грузское	0,0095·1,84 ^{±1}	13	с. Народичи	–
5	с. Приборск	0,0022·2,3 ^{±1}	14	с. Селец	–
6	с. Дитятки	0,0098·1,35 ^{±1}	15	с. Христиновка	0,0172·1,65 ^{±1}
7	с. Страхоlesье	0,007·1,78 ^{±1}	16	с. Ноздрище	–
8	с. Левков	0,0001·1,67 ^{±1}	17	с. Старое Село	0,0022·2,1 ^{±1}
9	с. Вороневе	0,0097·1,43 ^{±1}	18	с. Масевичи	0,0054·1,54 ^{±1}
Среднее взвешенное значение		0,0062·1,63 ^{±1}			
Hoffman, 1978 [13]		0,006			
Geetha, 2014 [14]		0,0056 – коровы молочных ферм 0,0063 – коровы местной породы			
МАГАТЕ [7, 10, 11]		0,0054·2,43 ^{±1}			

Для прогнозирования содержания ^{129}I в компонентах рациона и в молоке коров были использованы также данные других авторов, полученные в рамках международной программы по реконструкции дозовых нагрузок на щитовидную железу человека, обусловленных

^{131}I . Эти исследования, проведенные в 1993 и 1997 годах на территории Белоруссии [15] и в 1996–1997 годах на территории Украины [16–21]. Средняя погрешность определения изотопов йода в почве составила для ^{127}I – 9 % а для ^{129}I – 9,3 %.

Прогнозирование удельного содержания ^{129}I в растительных компонентах рациона и молоке коров актуально в Украине только для территорий, которые подверглись радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС. В работах [16, 18, 19, 22] показано, что на территориях, где плотность выпадений ^{137}Cs более 37 кБк/м^2 ($1,0 \text{ Ки/км}^2$), наблюдается корреляционная зависимость между плотностью выпадений ^{129}I и ^{137}Cs . Эти результаты были объединены и дополнены данными из работ [20, 21], что были получены в 30 км зоне и на севере Житомирской области, и пересчитаны с учетом радиоактивного распада

на момент выпадений (в 26.04–06.05 1986 г.). На основе этих данных была уточнена корреляционная зависимость между плотностью выпадений ^{137}Cs ($A_n^{137\text{Cs}}$, кБк/м^2) и ^{129}I ($A_n^{129\text{I}}$, мБк/м^2) для загрязненных ^{137}Cs территорий с плотностью выпадений более 37 кБк/м^2 на момент аварии (рис. 1).

$$A_n^{129\text{I}} = a \cdot (A_n^{137\text{Cs}})^b, \quad (3)$$

где $a=0,91 \pm 0,32$; $b=0,84 \pm 0,04$. Коэффициент корреляции равен $r = 0,85$, остаточное геометрическое отклонение $GSD_{\text{очн}} = 1,64$.

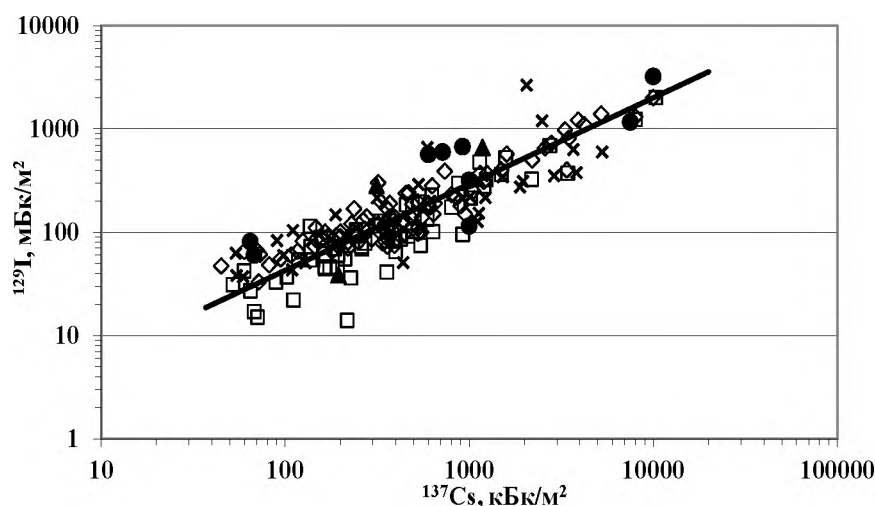


Рис. 1. Соотношение между плотностью выпадений ^{137}Cs и ^{129}I для территорий, загрязненных черновобльскими радиоактивными выпадениями в пересчете на 1986 г.: \diamond – данные работ [17,18], \square – [19]; \blacktriangle – [20] – Украинское Полесье; \bullet – данные работы [21] – черновобльская зона отчуждения; \times – данные работы [16] – Белоруссия

Прогнозирования содержания ^{129}I в растительных компонентах рациона коров нами подробно рассмотрены в работе [2]. В этой работе мы полностью используем полученные там результаты.

Вода так же является компонентом рациона коров. Между плотностью выпадений радионуклида на берегах малых водоемов (пруды, небольшие озера) и удельным содержанием его в воде существует корреляционная зависимость. Для ^{137}Cs это показано на рисунке 2а. Для анализа были использованы данные из малых водоемов (пруды, небольшие озера) Украины, Беларуси, России [22–24], что находятся за пределами 30 км зоны ЧАЭС. Для соответствующего анализа удельного содержимого ^{129}I в воде были

использованы результаты работ [25, 26] (Германия, Нижняя Саксония). Они также показывают, что между поверхностной плотностью выпадений ^{129}I (30 см слой почвы) и его содержанием в поверхностных водах наблюдается корреляционная зависимость (рис. 2б). В нашем случае в первом приближении для получения экспресс-оценки удельного содержания ^{129}I в водопойной воде было использовано соотношение

$$C_e^{129\text{I}} = 0.0025 \cdot a \cdot (A_n^{137\text{Cs}})^b.$$

Прогнозирование содержания йода в молоке коров в пастбищный и стойловый период принципиально не различаются, поскольку все определяет рацион животных.

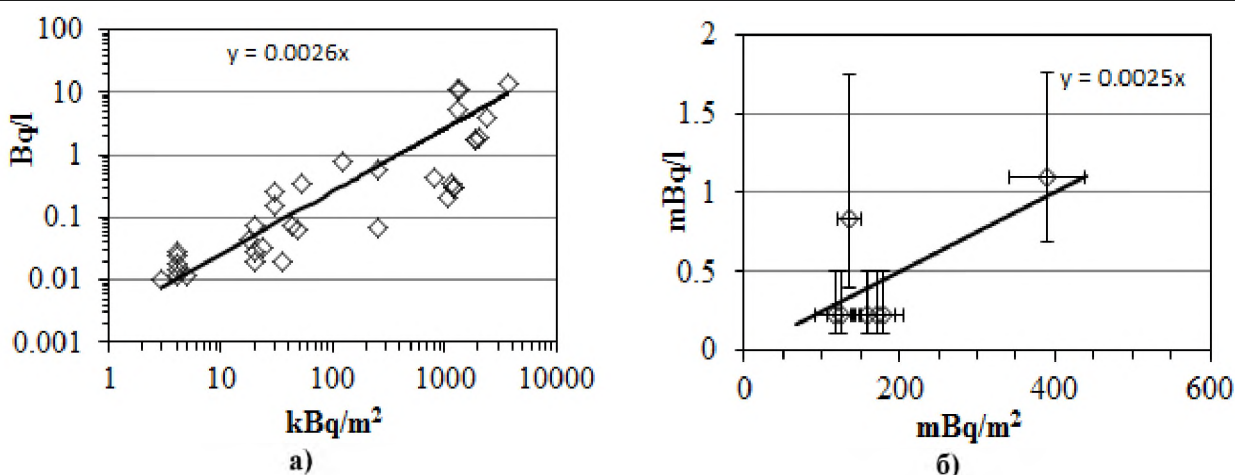


Рис. 2. Соотношение между плотностью выпадений радионуклида на берегах водоемов и удельным содержанием его в воде:
а) – для ^{137}Cs ; б) – для ^{129}I .

Поэтому, не нарушая общности подхода и методологии, в данной статье рассмотрен прогноз содержания ^{129}I в молоке коров только в пастбищный период. Было принято, что суточное потребление воды коровой в пастбищный период составляет 60 л (30 л – питьевая вода и 30 л – водопойная вода). При отсутствии водопоя считалось, что корова потребляет питьевую водопроводную воду. Также принято, что в сутки в пастбищный период корова потребляет 50 кг разнотравья, вместе с которым поступает 0,8 кг почвы и 1 кг комбикорма из зерна местного производства [27–29].

Результаты исследований

Основой вероятностного прогноза содержания ^{129}I в молоке коров является соотношение между плотностью выпадений ^{129}I и плотностью выпадений ^{137}Cs , которое имеет место при плотности выпадений ^{137}Cs больше 37 кБк/м² на момент аварии на ЧАЭС.

В работах [17–20] для 65-и населенных пунктов Украинского Полесья, загрязненных радиоактивными выпадениями в результате аварии на ЧАЭС (Народичский, Коростенский, Овручский, Полесский районы; II -я и III -я зоны), приведены результаты прямого определения плотности выпадений ^{129}I и соответствующие значения плотности ^{137}Cs , которые были получены по измерениям активности данного радионуклида в одних и тех же пробах почвы. В первом приближении приведенные данные по содержанию ^{129}I и ^{137}Cs в почве характеризуют в целом населенный

пункт и его окрестности. Для этих населенных пунктов методом статистического моделирования были сделаны вероятностные прогнозы удельного содержания ^{129}I в молоке коров с использованием плотности радиоактивного загрязнения ^{129}I и ^{137}Cs . При этом использовалось полученное нами среднее значение коэффициента перехода йода из суточного рациона в молоко коровы, которое равняется $F_m = 0,0062 \cdot 1,63^{+1}$. В качестве характеристик вариальности коэффициентов перехода ^{129}I в растительные компоненты рациона были взяты соответствующие средние значения GSD коэффициентов накопления ^{127}I (табл. 2). За оценку вариальности плотности радиоактивного загрязнения почвы ^{137}Cs в окрестностях населенного пункта, в первом приближении, использовали значение $GSD = 1,35$ ($s = 0,3$), для без градиентной по загрязнению ^{137}Cs площадки [30]. Вариальность плотности выпадений ^{129}I в окрестностях населенного пункта принималась равной $GSD = 1,50$. Это усредненное значение по населенным пунктам Немировка, Воронеж, Чигири, полученное на основе данных, приведенных в работе [18]. Используя методологию статистического моделирования [31], для каждого населенного пункта были определены распределения вероятностей возможных значений удельного содержания ^{129}I в молоке коров в пастбищный период по плотности выпадений ^{129}I и ^{137}Cs . Статистический анализ полученных распределений показал, что они хорошо аппроксимируются логнормальным

законом. При оговоренных выше исходных данных усредненное по всем населенным пунктом значение GSD составило: 1,65 – при прогнозировании по плотности выпадений ^{129}I ; 1,88 – при прогнозировании по плотности выпадений ^{137}Cs (дополнительная неопределенность, обусловленная соотношением (3). На рисунке 3 приведено соотношение между медианами возможных значений удельного

содержания ^{129}I в молоке коров при прогнозировании по плотности выпадений ^{129}I и ^{137}Cs .

Прогнозные значения удельного содержания ^{129}I в молоке коров, полученные с использованием плотности радиоактивного загрязнения почвы ^{129}I и ^{137}Cs , хорошо согласуются (рис. 3).

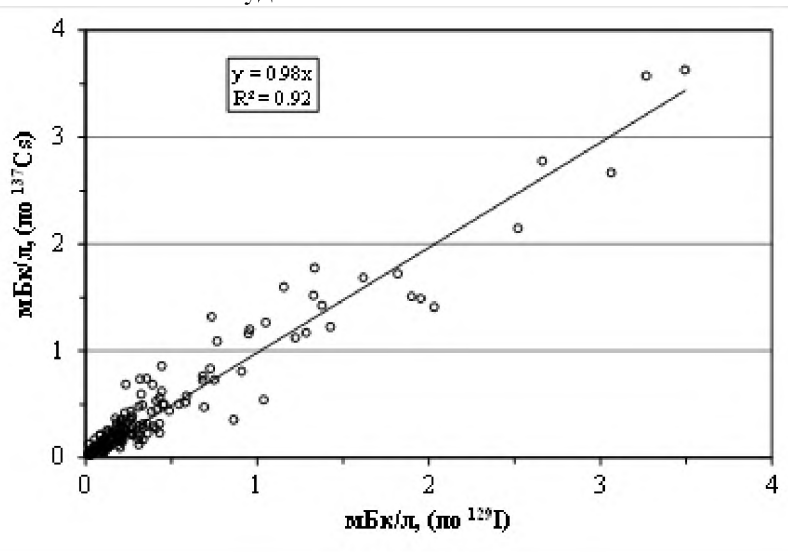


Рис. 3. Соотношение между медианами возможных значений удельного содержания ^{129}I в молоке коров при прогнозировании по плотности выпадений ^{129}I и ^{137}Cs

Таким образом, предлагаемую методологию вероятностной оценки удельного содержания ^{129}I в молоке коров без непосредственного измерения его в почве и растительных компонентах рациона можно с успехом использовать для прогнозирования содержания ^{129}I в молоке при плотностях выпадений ^{137}Cs более 37 кБк/м^2 в окрестностях населенного пункта.

Однако, изложенный выше подход связан с использованием определенных математических процедур и элементов программирования, требует соответствующей подготовки исполнителей и знания характеристик variability компонентов рациона коров (GSD).

Приведенные выше результаты статистического анализа возможных значений удельной активности ^{129}I в молоке коров для 65-и населенных пунктов Украинского Полесья (удельная активность ^{129}I в молоке коров имеет распределение вероятностей близкое к логнормальному с $GSD = 1,9$) позволяют значительно упростить процесс вероятностного

прогнозирования, ограничившись только средствами электронных таблиц EXCEL.

Предлагается следующий экспресс-метод вероятностного прогнозирования удельного содержания ^{129}I в молоке коров в населенном пункте.

1. Плотность выпадений ^{137}Cs на приусадебных участках, пастбищных и сенокосных угодьях оценивается по результатам радиологического мониторинга (или специальных обследований). Могут быть использованы данные дозиметрической паспортизации населенных пунктов Украины, которые в целом характеризуют плотность выпадений ^{137}Cs в населенном пункте и его окрестностях.

2. Собранные данные по плотности выпадений ^{137}Cs пересчитываются на момент аварии на ЧАЭС, 26.04.1986 г.

3. На основе соотношения $A_n^{129\text{I}} = a \cdot (A_n^{137\text{Cs}})^b$ оценивается среднее значение

плотности выпадений ^{129}I в населенном пункте и его окрестностях.

4. Среднее значение удельного содержания ^{129}I в водопойной воде оценивается на основе приближенного

$$\text{соотношения } C_a^{129\text{I}} = 0.0025 \cdot A_n^{129\text{I}}.$$

5. Среднее удельное содержание ^{129}I в растительных компонентах рациона животных оценивается на основе соотношений:

$$C_p^{129\text{I}} = (KH^{127\text{I}}/75) \cdot a \cdot (A_n^{137\text{Cs}})^b \text{ – сено, луговое}$$

$$\text{разнотравье; } C_p^{129\text{I}} = (KH^{127\text{I}}/150) \cdot a \cdot (A_n^{137\text{Cs}})^b \text{ – на}$$

$$\text{пахотных почвах.}$$

6. Значения коэффициентов накопления берутся из таблицы 2 или других источников.

7. На основе соотношения (1) и рациона животных в пастбищный или стойловый период рассчитывается среднее значение удельного содержания ^{129}I в молоке коров $\bar{C}_{129\text{I}}$.

8. Верхние и нижние границы возможного удельного содержания ^{129}I в молоке коров рассчитываются по формуле $C_{129\text{I}}^e (C_{129\text{I}}^n) = \text{Exp}(\text{Ln}(\bar{C}_{129\text{I}}) \pm U_p \cdot \text{Ln}(1.9))$, где U_p – квантиль нормального распределения (распределения Гаусса) для вероятности P.

9. Вероятность того, что возможное значение удельного содержания ^{129}I в молоке коров $C_{129\text{I}}$ будет ниже допустимого уровня C_0 (риск), рассчитываются по формуле $q = \Phi\left\{\frac{\text{Ln}(C_0) - \text{Ln}(\bar{C}_{129\text{I}})}{\text{Ln}(1.9)}\right\}$, где $\Phi(\dots)$ – нормированное распределение Гаусса.

Изложенная выше методология не требует специальной подготовки исполнителей, позволяет быстро обрабатывать большие массивы данных (информацию по населенным пунктам), что значительно ускоряет процесс вероятностного прогнозирования удельного содержания ^{129}I в молоке коров.

Используя электронные таблицы EXCEL при среднем значении $GSD = 1,9$, нами была построена карта распределения возможных значений удельного содержания ^{129}I в молоке коров Народничского района Житомирской области (рис. 4). Исходной информацией по плотности выпадений ^{137}Cs в населенных пунктах и их окрестностях были данные за 1991 год из сборника по дозиметрической паспортизации населенных пунктов Украины [32], которые были дополнены данными из работ [18–20].

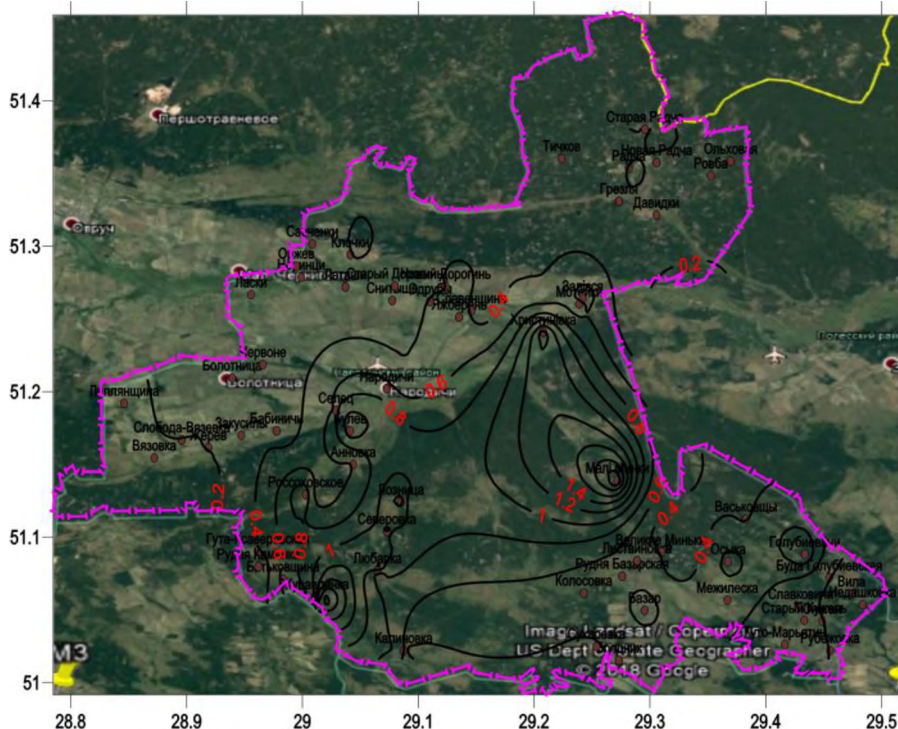


Рис. 4. Распределение возможных значений удельного содержания ^{129}I в молоке коров (верхние границы при $p = 0,95$) в Народничском районе Житомирской области, мБк/л

Выводы и перспективы дальнейших исследований

На основе вероятностного подхода к описанию удельного содержания изотопов ^{129}I в почве, растениях и возможных значений его коэффициентов накопления (перехода) предложена, реализована и апробирована на примере Народичского района Житомирской области методология прогнозирования удельной активности ^{129}I в молоке коров без непосредственного измерения его в почве и растительных компонентах рациона. В ее основе заложены коэффициенты накопления ^{127}I в растительных компонентах рациона коров и корреляционное соотношение между плотностью выпадений ^{129}I и ^{137}Cs в окрестностях населенного пункта при плотностях выпадений ^{137}Cs более 37 кБк/м².

Для практической реализации предложенной методологии были оценены статистические характеристики коэффициентов накопления ^{127}I в луговом разнотравье, картофеле, соломе (овес, пшеница) и коэффициентов перехода йода из суточного рациона в молоко коров в различных населенных пунктах континентальной Украины.

Предложен также приближенный экспресс-метод вероятностного прогнозирования удельного содержания ^{129}I в молоке коров в населенном пункте. Он позволяет значительно упростить процесс вероятностного прогнозирования, ограничившись только средствами электронных таблиц EXCEL, минуя методы и алгоритмы статистического моделирования.

Предложенная методология позволяет получать не только точечные оценки содержания ^{129}I в молоке коров, но и интервальные оценки с заданным пользователем уровня доверия, а также оценивать вероятности превышения (или не превышения) установленных (требуемых) значений его содержания в молоке.

References

1. Khomutinin, Yu. V., Kashparov, V. A., Lazarev, N. M., Otreshko, L. N. & Yoshchenko, L. V. (2017). Statisticheskiye kharakteristiki koeffitsiyenta perekhoda yoda iz ratsiona v moloko korov [Statistical characteristics of the iodine transfer factor from the diet to the milk of cows]. *Yaderna fizyka ta enerhetyka*, 18 (1), 81–86 [in Russian].

2. Khomutinin, Yu. V., Kashparov, V. A., Otreshko, L. N. & Yoschenko, L. V. (2017). Prognozirovaniye soderzhaniya ^{129}I v lugovom raznotravye pastbishch Korostenskogo i Narodichevskogo rayonov [Prediction of the contents of ^{129}I in meadow grass of Korostensky and Narodichevsky districts pastures]. *Yaderna fizyka ta enerhetyka*, 18 (4), 261–370 [in Russian].

3. Khomutinin, Yu. V., Kashparov, V. A., Lazarev, N. M., Otreshko, L. N. & Yoshchenko, L. V. (2018). Prognozirovaniye soderzhaniya yoda v moloke korov Ukrainского Polesia [Prediction of iodine content in the milk of Ukrainian Polissya cows]. *Problemy Chornobylskoi zony vidchuzhennia*, 19, 4–18 [in Russian].

4. Annenkov, B. N. & Yudintsiva, E. V. (1991). *Osnovy selskokhozyaystvennoy radiologii* [Fundamentals of Agricultural Radiology]. Moskva: Agropromizdat [in Russian].

5. Voigt, G. & Kiefer, P. (2007). Stable and radioiodine concentrations in cow milk: dependence on iodine intake *Journal of Environmental Radioactivity*, 98, 218–227.

6. Sheppard, S. C., Long, J. M. & Muramatsu, B. S. (2010). Transfer of iodine from soil to cereal grains in agricultural areas of Austria. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 1032–1037.

7. Sheppard, S. C., Sheppard, M. I., Tait, J. C. & Sanipelli, B. L. (2006). Revision and meta-analysis of selected biosphere parameter values for chlorine, iodine, neptunium, radium, radon and uranium. *Journal of Environmental Radioactivity*, 89, 115–137.

8. Shinonaga, T., Gerzabek, M. H., Strebl, F. & Muramatsu, Y. (2001). Transfer of iodine from soil to cereal grains in agricultural areas of Austria. *The Science of the Total Environment*, 267, 33–40.

9. International Atomic Energy Agency (2010). Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Vienna: IAEA-TRS-472.

10. International Atomic Energy Agency (2009). Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments. Vienna, TECDOC-1616.

11. Zaitsev, V., Trokhymenko, O. & Pysarev, Ye. (2010). Aktualni pytannia kontroliu vmistu yodu v kharchovykh produktakh, silskohospodarskii syrovyni ta biolohichnykh ridynakh. [Current issues of control of iodine content in food products, agricultural raw materials and biological fluids]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni*

Tarasa Shevchenka, *Khimiia*, 48, 47–49 [in Ukrainian].

12. Tomskiy tsentr standartizatsii. metrologii i sertifikatsii (2004). Metodika vypolneniya izmereniy sodержaniya yoda v pishchevykh produktakh. prodovolstvennom syrye. kormakh i produktakh ikh pererabotki. lekarstvennykh preparatakh. vitaminakh. BADakh. biologicheskikh obyektakh metodom inversionnoy voltamperometrii na analizatorakh tipa TA [Methods for measuring the content of iodine in food products, food raw materials, feed and their products, medicines, vitamins, dietary supplements, biological objects by stripping voltammetry on TA analyzers]. ^{MY 31-07/04} Tomsk [in Russian].

13. Hoffman, F. O. A. (1978). Review of measured values on the milk transfer coefficient (fm) for iodine. *Health Phys*, 35(2), 413–416.

14. Geetha, P. V., Prabhu, U., Yashodhara, I., Kumara, S., Karpe, R., Ravi, P. M., ... Karunakara, N. (2014). Grass to cow milk transfer coefficient (Fm) of Iodine for equilibrium and emergency situations. *Radiation Phjtection and Environment*, 37 (1), 14–20.

15. Straume, T., Anspaugh, L. R., Marchetti, A. A., Voigt, G., Minenko, V., Gu, F., ... Berlovich, S. (2006). Measurement of ¹²⁹I and ¹³⁷Cs in soils from Belarus and reconstruction of ¹³¹I deposition from the Chernobyl accident. *Health Physics*, 91 (1), 7–19.

16. Michel, R. (2011). Iodine-129 and Iodine-127 in the European Environment. Retrieved from www.irs.uni-hannover.de/tx.../I1292011.pdf.

17. Miche, R., Handl, J., Ernst, T., Botsch, W., Szidat, S., Schmidt, A., ... López-Gutiérrez, J. M. (2005). 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), 35–55.

18. Michel, R., Daraoui, A., Gorny, M., Jakob, D., Sachse, R., Romantschuk, L. D., Alfimov, V. & Sinal, H.-A. (2015). 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, 20–35.

19. Korntheuer, J. (2009). Analytik von ¹²⁷I und ¹²⁹I in Umweltproben (Der Diplomprüfung im Fach Chemie an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz). Retrieved from <https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esr>

c=s&source =web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiZhbL5g63RAHUBGiwKHYY08DWcQFg geMAE&url=https%3A%2F%2Fwww.irs.uni-hannover.de%2Fuploads%2Ftx tkpublikationen%2 Fdiplkorn.pdf&usg= AFQjCNH2JDom4fnILk92 KyxDSh5h0 CdpSg&sig2=hw3LRTZ-tF1HFws Hwwqc3A.

20. Sarata, K. Sahoo, Yasuyuki, M., Satoshi, Y., Hiroyuki, M. & Werner, R. (2009). 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, 325–332.

21. Romanchuk, L. D. (2015). Radioekolohichna otsinka formuvannia dozovoho navantazhennia u meshkantsiv silskykh terytorii Polissia Ukrainy [Radioecological assessment of the formation of the dose load of the inhabitants of rural areas Polissya Ukraine]. Zhytomyr: Polissia [in Ukrainian].

22. Kuzmenko, M. I., Romanenko, V. D. & Derevets, V. V. (2001). Radionuklidy v vodnykh ekosystemakh Ukrainy. Vplyv radioaktyvnoho zabrudnennia na hidrobiosy zony vidchuzhennia [Radionuclides in water ecosystems of Ukraine. The Influence of Radioactive Contamination on the Hydrobiosis of the Exclusion Zone]. Kyiv: Chornobylinterinform [in Ukrainian].

23. Zhukova, O. M., Germenchuk, M. G., Shagalova, E. D., Matveyenko, I. I. & Vakulovsky, S. M. (2003). Radioaktivnoye zagryazneniye vodnykh obyektov na territorii Bryansko-Gomelsko-Mogilevskogo Chernobyl'skogo «pyatna» i sovershenstvovaniye deystvuyushchey sistemy radiatsionnogo monitoringa [Radioactive contamination of water bodies on the territory of the Bryansk-Gomel-Mogilev Chernobyl “spot” and the improvement of the existing system of radiation monitoring]. *Prirodnyye resursy*, 1, 82–85.

24. Razdorskikh, A.V. & Marchenko, Yu. D. (2008). Monitoring radioaktivnogo zagryazneniya ikhtiofauny vodoyemov Poles'skogo gosudarstvennogo radiatsionnoekologicheskogo zapovednika v 2007 godu [Monitoring of the radioactive contamination of the ichthyofauna of the reservoirs of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve in 2007]. *Sakharovskiye chteniya 2008 goda: ekologicheskkiye problemy XXI veka: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* (p. 159). Minsk [in Russian].

25. Ernst, T. (2003). 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). Universität Hannover. Retrieved from https://www.irs.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/dreinst.pdf.

26. Szida, T. S. (2000). Iod-129: Probenvorbereitung, Qualitätssicherung und Analyse von Umweltmaterialien. (Dissertation von Doktor der Naturwissenschaften). Universität Hannover. Retrieved from <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e002/32217211X.pdf>.

27. Kapus, M. M., Slavov, V. P., Prister, B. S., Lapa, M. A. & Martyniuk H. M. (1994). Detalizovana pozhyvnysh kormiv ta ratsiony hodivli koriv u zoni radioaktyvnoho zabrudnennia Polissia Ukrainy [Detailed nutrition of feed and ration feeding cows in the area of radioactive contamination Polissya Ukraine]. Zhytomyr: Teteriv [in Ukrainian].

28. Kashparov, V., Colle, C. & Zvarich, S. (2005). Soil-to-plant halogens transfer studies 1. Root uptake of ra-dioiodine by plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 79 (2), 187–204.

29. Colle, C., Kashparov, V. & Zvarich, S. (2005). Fate of long-lived radioactive halogens, (^{36}Cl , ^{129}I), in agricultural ecosystems. *Field investigations, Radioprotection*, 40 (1), 329–334.

30. Khomutinin, Yu. V. (2003). Optimizatsiya probotoobra pri otsenke plotnosti radioaktivnykh vypadeniy [Optimization of sampling in assessing the density of radioactive fallout]. *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu yadernykh doslidzhen*, 1 (9), 145–155 [in Russian].

31. Sobol, I. M. (1968). Metod Monte-Karlo [Monte-Carlo Method]. Moskva: Nauka [in Russian].

32. Ministerstvo zdravookhraneniya Ukrainy (1993). Dozimetriceskaya pasportizatsiya naselennykh punktov Ukrainy. podvergshikhsya radiatsionnomu zagryazneniyu posle chernobylskoy avarii [Dosimetric certification of settlements of Ukraine exposed to radiation pollution after the Chernobyl accident]. Kiev [in Russian].

ІМОВІРНІСНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ВМІСТУ ^{129}I В МОЛОЦІ КОРІВ

Ю. В. Хомутінін, В. О. Кашпаров,
М. М. Лазарєв, Л. М. Отрешко, Л. В. Йошенко
e-mail: khomutinin@gmail.com

Український науково-дослідний інститут
сільськогосподарської радіології
НУБіП України,

вул. Машинобудівників, 7, смт. Чабани, Києво-
Святошинський р-н, 08162, Україна

Дана робота завершує 5-річний цикл досліджень щодо оцінки основних біогенних потоків ^{127}I і ^{129}I в типових агроєкосистемах України, які проводилися в УкрНДІСХР Національного університету біоресурсів і природокористування України. Одним з основних джерел надходження ізотопів йоду в організм людини є молоко корів. Для прогнозування вмісту ізотопів йоду в молоці потрібно визначити їх вміст у компонентах добового раціону (воді, траві, сіні, зерні та його похідних). У даній роботі на підставі імовірнісного підходу до опису питомого вмісту ізотопів ^{129}I в ґрунті, рослинах і можливих значень його коефіцієнтів накопичення (переходу) запропонована, реалізована і апробована на прикладі Народицького району Житомирської області методологія прогнозування питомої активності ^{129}I в молоці корів без безпосереднього вимірювання його в ґрунті і рослинних компонентах раціону. Для практичної реалізації запропонованої методології були оцінені статистичні характеристики коефіцієнтів накопичення ^{127}I в луговому різнотрав'ї, картоплі, соломі (овес, пшениця) і коефіцієнтів переходу йоду з добового раціону в молоко корів у різних населених пунктах континентальної України. Область досліджень охоплює як площі, що зазнали значного радіоактивного забруднення у результаті аварії на ЧАЕС, так і відносно «чисті» території. Запропонована методологія дозволяє отримувати не лише точкові оцінки вмісту ^{129}I в молоці корів, а й інтервальні оцінки з заданим користувачем рівнем довіри, а також оцінювати можливі перевищення встановлених нормативів цього вмісту. Запропоновано і апробовано наближений експрес-метод імовірнісного прогнозування питомого вмісту ^{129}I в молоці корів у населеному пункті. Він дозволяє значно спростити процес імовірнісного прогнозування, обмежившись

лише засобами електронних таблиць EXCEL, минаючи методи і алгоритми статистичного моделювання.

Ключові слова: ймовірнісне прогнозування, ^{129}I в молоці корів, ризик перевищення встановлених нормативів.

THE PROBABILITIES OF FORECASTING OF CONTENT OF ^{129}I IN COW'S MILK

Yu. Khomutinin, V. Kashparov, N. Lazarev,

L. Otrushko, L. Yoschenko

e-mail: khomutinin@gmail.com

Ukrainian Research Institute of Agricultural Radiology NUBiP of Ukraine,

7, Mashinostroiteley Str., Chabany, Kiev-Svyatoshinsky district, 08162, Ukraine

This work completes the cycle of five-year studies on the main nutrient streams of ^{127}I and ^{129}I in typical agroecosystems of Ukraine, which was held at the National University of Life Sciences and Natural Resources of Ukraine "UkrNDISH". One of the main sources of isotope iodine in humans is cow's milk. To predict the iodine content of milk, it is necessary to determine their content in the components of the daily diet (water, herbs, hay, grain and its derivatives). In the work on the basis of the probabilistic approach to the description of the specific content of ^{129}I isotopes in the soil of plants and possible values of the coefficients of its accumulation (transition) on the example of the

Naroditsky district of Zhytomyr region, a methodology for predicting the specific activity of ^{129}I in milk of cows without direct measurement in soil and vegetable components of the diet was developed. For the practical implementation of the proposed methodology, the statistical characteristics of the accumulation coefficients ^{127}I for meadow grasses, potatoes, straw (oats, wheat) and iodine transfer coefficients from the daily ration to cow's milk for various settlements of continental Ukraine were estimated. The scope of research covers the areas that have undergone significant radioactive contamination as a result of the Chernobyl accident and relatively "clean" territory. The proposed methodology allows to obtain point, as well as interval estimates of the contents of ^{127}I and ^{129}I in of cows milk, with the level of trust that the user specifies, as well the evaluate possible exceedances of the established norms of this content. An approximate expres method of probabilistic prediction of specific content of ^{129}I in cow's milk in the settlements is proposed and tested. This can greatly simplify the probabilistic forecasting process by confining itself to the means of the EXCEL spreadsheets, bypassing methods and algorithms for statistical simulation.

Keywords: the probability of forecast, ^{129}I in cow's milk, risk of exceeding of established norms.