

Ю. В. Хомути́нин, В. А. Кашпа́ров, Н. М. Лазаре́в,
Л. Н. Отре́шко, Л. В. Йо́щенко

Український науково-дослідницький інститут сільськогосподарської радіології
НУБіП України, Київ

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕХОДА ИЗОТОПОВ ЙОДА ИЗ РАЦИОНА В МОЛОКО КОРОВ

Оценены и проанализированы коэффициенты перехода изотопов йода из суточного рациона в молоко коровы в пастбищный период для различных почвенно-ландшафтных условий Украины. Показано, что возможные значения рассматриваемого коэффициента перехода являются случайной величиной, которая удовлетворительно описывается логнормальным законом распределения вероятностей. Получены оценки медиан ($GM = 0,046 \pm \pm 0,003$) и геометрических стандартных отклонений ($GSD = 1,79$) возможных значений коэффициента перехода йода из суточного рациона в молоко коровы. Они уточняют справочные данные МАГАТЭ применительно к конкретным почвенно-ландшафтным условиям континентальной Украины и позволяют получать менее консервативные оценки при прогнозировании удельного содержания изотопов йода в молоке коров в пастбищный период.

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

Введение

Йод является важным биогенным элементом для организма человека и других млекопитающих. Низкое содержание йода в почве, воде и сельскохозяйственной продукции вызывает у человека развитие так называемых йоддефицитных заболеваний. Молоко коров является основным источником поступления йода в организм человека. В случае загрязнения пастбищной растительности и рациона коров радиоактивными изотопами йода «молочный» путь поступления йода (в первую очередь ^{131}I) в организм обуславливает больше 90 % поглощенной дозы облучения щитовидной железы человека.

В результате Чернобыльской аварии в атмосферу было выброшено около $1,8 \cdot 10^{18}$ Бк ^{131}I ($T_{1/2} = 8$ сут) и $4 \cdot 10^{10}$ Бк ^{129}I ($T_{1/2} = 1,6 \cdot 10^7$ лет) [1]. В конце апреля – первой половине мая 1986 г. удельная активность ^{131}I в молоке коров достигала сотен тысяч Бк/л, что привело к высоким дозам облучения щитовидной железы населения и последующему увеличению частоты возникновения раков щитовидной железы у детей [2]. Наибольшему загрязнению радионуклидами йода в 1986 г. подверглась эндемичная по содержанию стабильного йода (^{127}I) территория Украинского Полесья с низким его содержанием в рационе питания населения, включая молоко, что также усилило последствия облучения щитовидной железы детей.

В результате испытаний ядерного оружия, выбросов предприятий ядерно-топливного цикла, а также выбросов из аварийного чернобыль-

ского реактора и реакторов АЭС Фукусимы отношение сверхдолгоживущего ^{129}I и стабильного ^{127}I ($^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$) в окружающей среде за последние 70 лет монотонно увеличивалось и эти изменения радиоактивного фона на длительное время необходимо учитывать [3]. Исходя из вышеизложенного, прогнозирование содержания изотопов йода, включая радиоактивные, в молоке коров является важной научной и практической задачей.

При стабильном рационе кормления молочных коров с фиксированным суточным содержанием йода в молоке уже через два-три дня устанавливается его равновесная концентрация между рационом и молоком [4, 5]. В этом случае удельная концентрация/активность йода в молоке в первом приближении может быть рассчитана по формуле [5, 6]

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

где p_j – суточное потребление j -й компоненты рациона животным, кг/сут; C_j – удельное содержание (активность) йода в j -й компоненте рациона животного, мг/кг (Бк/л); F_m – коэффициент перехода йода из суточного рациона в молоко коров при их постоянном содержании его в рационе, сут/л.

Таким образом, чтобы воспользоваться приведенной формулой для прогнозирования удельного содержания в молоке коров, необходимо знать коэффициент перехода F_m или его оценку.

© Ю. В. Хомути́нин, В. А. Кашпа́ров, Н. М. Лазаре́в, Л. Н. Отре́шко, Л. В. Йо́щенко, 2017

Следует отметить, что коэффициент перехода F_m является одинаковым для всех изотопов йода [6, 7]. В данной работе его оценки получены на основе измерений удельного содержания стабильного ^{127}I в молоке и компонентах пастбищного рациона коров. Они охватывают населенные пункты, расположенные в различных почвенно-ландшафтных условиях континентальной Украины, как территории, подвергшиеся значительному радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС, так и относительно «чистые» территории.

Объекты и методы исследований

В УкрНИИСХР в 2014 - 2016 гг. проводились исследования по изучению биогенной миграции ^{127}I . В рамках этих исследований на тестовых площадках, расположенных в различных почвенно-ландшафтных условиях, проводился отбор проб объектов окружающей среды, в которых определялось удельное содержание ^{127}I .

Для определения йода в образцах использовались три метода: титриметрический, спектрофотометрический кинетический [8, 9] и инверсионной вольтамперометрии на анализаторе ТА-4 [10]. 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.

Тестовая площадка включала частное хозяйство с коровой, огород, сенокос и пастбища для коровы. Объектами мониторинга на каждой тестовой площадке были: молоко коровы, питьевая и водопойная вода с различных источников (озеро, река, пруд), почва, луговое разнотравье, солома злаковых культур (рожь, пшеница, овес), картофель. Сопряженные пробы «почва - растения» отбирались на пробной площадке площадью не более 1 м^2 . Пробы отбирались с июня по сентябрь (табл. 1).

Анализ результатов измерения удельного содержания йода C_j в различных объектах окружающей среды (почва, сено, солома, зерно, клубнеплоды, вода) в конкретный момент времени показали, что эти величины являются случайными и описываются логнормальным законом распределения вероятностей. Это подтверждается как литературными данными [11, 12], так и статистическим анализом упомянутых выше собственных результатов УкрНИИСХР.

Таблица 1. Краткая характеристика тестовых площадок

№ пл.	Место расположения	Тип почвы	Объекты мониторинга	Общее количество отобранных проб
1	Николаевская область, Кривоозерский район, н.п. Березки	чернозем типичный	вода, молоко, картофель, солома пшеницы, люцерна, луговое разнотравье, почва	9
2	Киевская область, Белоцерковский район, н.п. Песчаная	чернозем выщелоченный	вода, молоко, картофель, солома пшеницы, сено, луговое разнотравье, почва	22
3	Киевская область, Богуславский район, н.п. Саварка	чернозем типичный	вода, молоко, картофель, солома пшеницы, луговое разнотравье, почва	6
4	Киевская область, Макаровский район, н.п. Грузское	серая лесная	вода, молоко, картофель, солома пшеницы и овса, сено, пырей, луговое разнотравье, почва	19
5	Киевская область, Иванковский район, н.п. Приборск	дерново-подзолистая песчаная	вода, молоко, картофель, солома овса, овес на корм, сено, люцерна, луговое разнотравье, почва	35
6	Киевская область, Иванковский район, н.п. Дитятки	дерново-подзолистая песчаная	вода, молоко, картофель, солома пшеницы, сено, луговое разнотравье, почва	9
7	Житомирская область, Житомирский район, н.п. Левков	дерново-среднеподзолистая супесчаная	вода, молоко, картофель, сено, луговое разнотравье, почва	7
8	Ровенская область, Рокитновский район, н.п. Старое Село	торфяно-болотная	вода, молоко, картофель, овес на корм, сено, луговое разнотравье, почва	25
9	Ровенская область, Рокитновский район, н.п. Масевичи	торфяно-болотная	вода, молоко, картофель, солома пшеницы и овса, сено, луговое разнотравье, почва	17

Параметрами, полностью определяющими логнормальный закон распределения вероятностей, являются среднее геометрическое (медиана) – GM и геометрическое стандартное отклонение – GSD [13]. Полученные нами оценки этих

параметров (средние по тестовым площадкам) для основных компонентов рациона коровы, а также для почвы и молока в пастбищный период приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Значение GM для удельного содержания ^{127}I в компонентах суточного рациона коровы и молоке для различных тестовых площадок, мг/кг

№ пл.	Вода питьевая	Вода водопойная	Луговое разнотравье	Комбикорм*	Почва	Молоко
1	0,0024	–	0,23	0,06	2,0	0,112
2	0,0019	0,0057	0,44	0,019	4,6	0,119
3	0,0010	0,0032	2,0	0,023	6,6	0,124
4	0,0024	0,0117	0,3	0,036	0,5	0,162
5	0,0019	0,0020	0,55	0,044	2,9	0,080
6	0,026	–	0,28	0,042	0,15	0,047
7	0,021	–	2,1	0,041	1,1	0,323
8	0,0016	0,0065	0,67	0,062	2,0	0,076
9	0,0010	0,016	0,34	0,012	1,2	0,112

* Расчетные значения в соответствии с [6, 7].

Таблица 3. Усредненное по тестовым площадкам значение GSD для удельного содержания ^{127}I в компонентах суточного рациона коровы и молоке

№ пл.	Объект окружающей среды	GSD
1	Вода питьевая	1,5
2	Вода водопойная	2,0
3	Сено (луговое разнотравье)	1,61
4	Комбикорм из зерна местного производства	1,64
5	Почва	1,54
6	Молоко	1,45

Поскольку в наших исследованиях удельное содержание ^{127}I измерялось в соломе, то для оценки удельного содержания ^{127}I в зерне использовалось соотношение между удельными содержаниями ^{127}I в зерне и соломе [14, 15]. По данным [14, 6, 7], удельное содержание ^{127}I , которое измерялось в зерне, в среднем составляет 1,2 % от его содержания в соломе. Удельное содержание ^{127}I в разнотравье определялось для воздушно-сухой массы. Для пересчета полученных значений на естественную влажность использовался коэффициент 0,21 [7].

В данной работе вода и растения рассматриваются как компоненты рациона коровы в пастбищный период. Для моделирования поступления йода в молоко коровы было принято, что общее суточное потребление воды составляет 60 л. В общем случае 30 л – питьевая вода и 30 л – водопойная вода. При отсутствии водопоя считалось, что корова потребляет только питьевую водопроводную воду. Было также принято, что в сутки в пастбищный период корова потребляет

50 кг разнотравья, вместе с которым поступает 0,8 кг почвы [14, 15] и 1 кг комбикорма из зерна местного производства.

Выражение для получения оценок равновесного коэффициента перехода йода из суточного рациона в молоко коров имеет вид

$$F_m = C_m / \sum_{j=1} p_j \cdot C_j \quad (2)$$

Изложенные выше результаты говорят о том, что параметр F_m необходимо рассматривать как случайную величину, зависящую от нескольких случайных аргументов, имеющих логнормальные распределения вероятностей.

Результаты и обсуждение

Распределения вероятностей возможных значений параметра F_m и его статистические характеристики (среднее геометрическое GM и геометрическое стандартное отклонение GSD) оценивались с помощью статистического моделирования методом Монте-Карло [16] для приведенного выше выражения (2) с использованием экспериментально полученных статистических характеристик для молока коров и компонентов из суточного рациона (см. табл. 2 и 3). Число реализаций принималось равным 5000.

Полученные результаты показали, что распределение вероятностей $f(x)$ возможных значений коэффициента перехода йода из суточного рациона в молоко коров F_m также удовлетворительно описывается логнормальным законом распределения вероятностей. На рис. 1 это показано на примере результатов моделирования, полученных для тестовой площадки «Приборск».

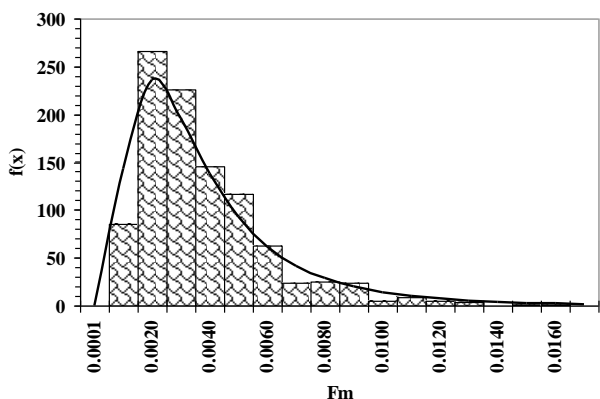


Рис. 1. Гистограмма распределения возможных значений коэффициента перехода йода из суточного рациона в молоко коровы и ее аппроксимация логнормальным законом для тестовой площадки «Приборск».

В табл. 4 для тестовых площадок приведены полученные в результате статистического моделирования оценки для среднего геометрического (медианы) GM и геометрического стандартного отклонений GSD возможных значений коэффициента перехода йода из суточного рациона в молоко коровы при потреблении питьевой и водопойной воды в соотношении 1:1. Там же, для сравнения, приведены литературные данные.

Таблица 4. Статистические характеристики коэффициента перехода йода (F_m) из суточного рациона в молоко коровы

Площадка	GM	GSD
н.п. Березки	0,0083	1,72
н.п. Песчаная	0,0044	1,71
н.п. Саварка	0,0012	2,01
н.п. Грузское	0,0100	1,75
н.п. Приборск	0,0026	1,77
н.п. Дитятки	0,0032	1,83
н.п. Левков	0,0032	1,83
н.п. Старое Село	0,0021	1,75
н.п. Масевичи	0,0059	1,76
Среднее значение	0,0046	1,79
Hoffman, 1978 [9]	0,006	
Geetha, 2014 [10]	0,0056 – коровы молочных ферм 0,0063 – коровы местной породы	
МАГАТЭ [6, 7, 11]	0,0054	2,43

Вид распределения вероятностей $f(x)$ возможных значений коэффициента перехода йода из суточного рациона в молоко коровы в пастбищный период при потреблении питьевой и водопойной воды в соотношении 1:1 для различных тестовых площадок показан на рис. 2. Там же приведено распределение возможных значений F_m , соответствующих данным МАГАТЭ.

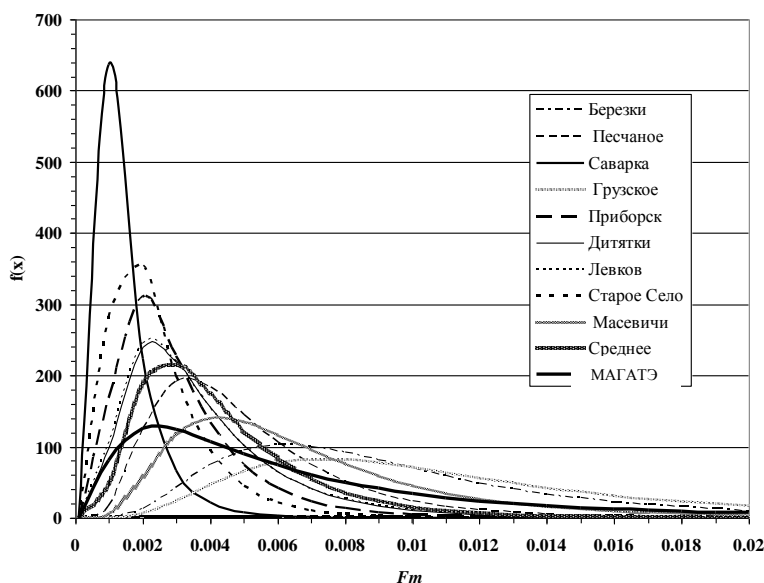


Рис. 2. Распределение возможных значений коэффициента перехода йода из суточного рациона в молоко коровы в пастбищный период.

Из табл. 4 видно, что различие медианных значений коэффициента перехода F_m на тестовых площадках (в населенных пунктах) значимо, среднее значение этих величин равно $0,046 \pm 0,003$. Это, по-видимому, связано не только с различием почвенно-ландшафтных условий на тестовых площадках, но и с индивидуальными особенностями и физиологическим

состоянием коров. Однако это среднее значение статистически не отличается от оценок, приведенных в справочниках МАГАТЭ [6, 7].

Выводы

В рамках изучения биогенной миграции ^{127}I в различных почвенно-ландшафтных условиях Украины методом статистического моделирова-

ния проведена оценка коэффициентов перехода йода из суточного рациона в молоко коровы в пастбищный период. Показано, что возможные значения рассматриваемого коэффициентов перехода являются случайной величиной, которая удовлетворительно описывается логнормальным законом распределения вероятностей. Полученные оценки медиан коэффициентов перехода показали, что они существенно различаются в населенных пунктах, расположенных в различных почвенно-ландшафтных условиях Украины, однако хорошо согласуются со справочными данными МАГАТЭ. Эти оценки справедливы и

для радиоактивных изотопов йода. Во всех рассмотренных случаях геометрическое стандартное отклонение возможных значений коэффициента перехода йода из суточного рациона в молоко коровы оказалось значительно меньше ($GSD = 1,79$), чем приведенное в справочных данных МАГАТЭ ($GSD = 2,43$). Использование этих значений при прогнозировании удельного содержания йода в молоке коров позволит получать менее консервативные оценки, соответствующие конкретным условиям Украины в случае ядерных и радиационных аварий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Steinhauser G., Brandl F., Johnson T.E.* Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts // *Science of the Total Environment*. - 2014. - Vol. 470 - 471. - P. 800 - 817.
2. *Тридцять років Чорнобильської катастрофи: радіологічні та медичні наслідки: Національна доповідь України.* - Київ, 2016. - 177 с.
3. *Hoshi M., Yamamoto M., Kawamura H. et al.* Fallout radioactivity in soil and food samples in Ukraine: measurements of iodine, plutonium, cesium, and strontium isotopes // *Health Phys.* - 1994. - Vol. 67(2). - P. 187 - 191.
4. *Анненков Б.Н., Юдинцева Е.В.* Основы сельскохозяйственной радиологии. - М.: Агропромиздат, 1991. - 287 с.
5. *Voigt G., Kiefer P.* Stable and radioiodine concentrations in cow milk: dependence on iodine intake // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2007. - Vol. 98. - P. 218 - 227.
6. *Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments.* - Vienna, IAEA-TECDOC-1616, 2009. - 622 p.
7. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments.* - Vienna, IAEA-TRS-472, 2010. - 194 p.
8. *Определение йода в воде: методические указания.* МУК 4.1.1090-02 (Утв. главным государственным санитарным врачом РФ 04.01.2002).
9. *ДСТУ 4816:2007.* Продукти харчові. Методи визначення загального йоду.
10. *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.
11. *Sheppard S.C., Long J.M., Muramatsu B.S.* Transfer of iodine from soil to cereal grains in agricultural areas of Austria // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2010. - No. 101. - P. 1032 - 1037.
12. *Sheppard S.C., Sheppard M.I., Tait J.C., Sanipelli B.L.* Revision and meta-analysis of selected biosphere parameter values for chlorine, iodine, neptunium, radium, radon and uranium // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2006. - No. 89. - P. 115 - 137.
13. *Афифи А., Эйзен С.* Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. - М.: Мир, 1992. - 488 с.
14. *Kashparov V., Colle C., Zvarich S. et al.* Soil-to-plant halogens transfer studies 1. Root uptake of radioiodine by plants // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2005. - Vol. 79, Iss. 2. - P. 187 - 204.
15. *Colle C., Kashparov V., Zvarich S. et al.* Fate of long-lived radioactive halogens, (^{36}Cl , ^{129}I), in agricultural ecosystems: Field investigations, Radioprotection. - 2005. - Vol. 40, No. Suppl. 1. - P. S329 - S334.
16. *Соболь И.М.* Численные методы Монте-Карло. - М.: Физматлит, 1973. - 312 с.

**Ю. В. Хомутінін, В. О. Кашпаров, М. М. Лазарєв,
Л. М. Отрешко, Л. В. Йощенко**

Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології НУБіП України, Київ

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЕФІЦІЄНТА ПЕРЕХОДУ ІЗОТОПІВ ЙОДУ З РАЦІОНУ В МОЛОКО КОРІВ

Оцінено та проаналізовано коефіцієнти переходу ізоотопів йоду з добового раціону в молоко корови в пасовищний період для різних ґрунтово-ландшафтних умов України. Показано, що можливі значення даного коефіцієнта переходу є випадковою величиною, яка задовільно описується логнормальним законом розподілу ймовірностей. Отримано оцінки медіан ($GM = 0,046 \pm 0,003$) і геометричних стандартних відхилень ($GSD = 1,79$) можливих значень коефіцієнта переходу йоду з добового раціону в молоко корови. Вони уточнюють довідкові дані МАГАТЭ

стосовно конкретних ґрунтово-ландшафтних умов континентальної України і дозволяють отримувати менш консервативні оцінки при прогнозуванні питомого вмісту йоду в молоці корів у пасовищний період.

Ключові слова: ізотопи йоду ^{127}I і ^{129}I , біогенні потоки, моніторинг, міграція, прогноз, коефіцієнт накопичення, агро-екосистеми, раціон.

Yu. V. Khomutinin, V. O. Kashparov, M. M. Lazarev, L. M. Otreshko, L. V. Ioshchenko

*Ukrainian Scientific Research Institute of Agricultural Radiology,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv*

STATISTICAL DATA ON TRANSFER FACTORS OF IODINE ISOTOPES FROM THE DIET TO MILK OF COWS

The transfer factors of iodine isotopes from the daily diet to milk of the cows in the pasture period for different soil and landscape conditions of Ukraine were evaluated and analyzed. It was shown that the possible values of the considered coefficient of the transition is a random variable, which is satisfactorily described by the lognormal distribution law of probabilities. The resulting estimates of medians ($GM = 0.046 \pm 0.003$) and the geometric standard deviation ($GSD = 1.79$) for possible iodine conversion coefficient of the daily diet in cow's milk were obtained. They refine the IAEA reference data for specific soil-landscape conditions of continental Ukraine and allow obtaining less conservative estimates when predicting the specific content of iodine isotopes in the milk of cows in the pasture period.

Keywords: iodine isotopes ^{127}I and ^{129}I , biogenic flows, monitoring, migration, forecast, transfer factors, accumulation coefficient, agro-ecosystems, diet.

REFERENCES

1. *Steinhauser G., Brandl F., Johnson T.E.* Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts // *Science of the Total Environment*. - 2014. - Vol. 470 - 471. - P. 800 - 817.
2. *Thirty years after the Chernobyl disaster, radiological and medical consequences: National Report of Ukraine*. - Kyiv, 2016. - 177 p. (Ukr)
3. *Hoshi M., Yamamoto M., Kawamura H. et al.* Fallout radioactivity in soil and food samples in Ukraine: measurements of iodine, plutonium, cesium, and strontium isotopes // *Health Phys.* - 1994. - Vol. 67(2). - P. 187 - 191.
4. *Annenkov B.N., Yudin E.V.* Fundamentals of Agricultural Radiology. - Moskva: Agropromizdat, 1991. - 287 p. (Rus)
5. *Voigt G., Kiefer P.* Stable and radioiodine concentrations in cow milk: dependence on iodine intake // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2007. - Vol. 98. - P. 218 - 227.
6. *Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments*. - Vienna, IAEA-TECDOC-1616, 2009. - 622 p.
7. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*. - Vienna, IAEA-TRS-472, 2010. - 194 p.
8. *Determination of iodine in the water: guidelines*. MUK 4.1.1090-02 (Approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation 04.01.2002). (Rus)
9. *State Standard 4816: 2007*. Food products. Methods for determination of total iodine. (Ukr)
10. *Method for measuring of iodine content in foods, food raw materials, feed and processed products, medicines, vitamins, dietary supplements, biological objects by stripping voltammetry at the TA (MU 31-07/04) analyzers' type*. - Tomsk, 2004. - 20 p. (Rus)
11. *Sheppard S.C., Long J.M., Muramatsu B.S.* Transfer of iodine from soil to cereal grains in agricultural areas of Austria // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2010. - No. 101. - P. 1032 - 1037.
12. *Sheppard S.C., Sheppard M.I., Tait J.C., Sanipelli B.L.* Revision and meta-analysis of selected biosphere parameter values for chlorine, iodine, neptunium, radium, radon and uranium // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2006. - No. 89. - P. 115 - 137.
13. *Ajifi A., Eisen S.* Statistical analysis. The approach of computer using. - Moskva: Mir, 1992. - 488 p. (Rus)
14. *Kashparov V., Colle C., Zvarich S. et al.* Soil-to-plant halogens transfer studies 1. Root uptake of radioiodine by plants // *Journal of Environmental Radioactivity*. - 2005. - Vol. 79, Iss. 2. - P. 187 - 204.
15. *Colle C., Kashparov V., Zvarich S. et al.* Fate of long-lived radioactive halogens, (^{36}Cl , ^{129}I), in agricultural ecosystems: Field investigations, Radioprotection. - 2005. - Vol. 40, No. Suppl. 1. - P. S329 - S334.
16. *Sobol I.M.* Numerical Monte Carlo methods. - Moskva: Fizmatlit, 1973. - 312 p. (Rus)

Надійшла 18.11.2016
Received 18.11.2016