

УДК 539.163:637.12:631.4

С. А. КАЛИНИЧЕНКО¹, В. С. АВЕРИН²

ПРОГНОЗ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В МОЛОКЕ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА С УЧЕТОМ ПОЧВЕННОЙ КОМПОНЕНТЫ РАЦИОНА

¹Институт радиологии,

²Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека

(Поступила в редакцию 11.04.2006)

Введение. При выпасе на низкопродуктивных пастбищах жвачные животные потребляют почву, находящуюся на поверхности растительности и с верхним дернинным слоем. Количество почвы, твердо закрепленной растительностью, зависит от таких факторов, как степень увлажнения, тип почвы и погодные условия. Величина потребления почвы животным может достигать 18% ежедневного поступления сухого вещества крупному рогатому скоту (КРС) [27]. При моделировании процессов загрязнения продукции животноводства предполагают, что ¹³⁷Cs, поступивший с почвой, имеет такие же величины перехода, как и цезий, заключенный в тканях растений. В настоящее время в некоторых моделях пытаются дифференцировать биодоступность в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) животных ¹³⁷Cs из почвенных частиц и находящегося в растительности. В этих моделях заложено, что сама потребленная почва не влияет на высвобождение ¹³⁷Cs из растительности, однако глинистые минералы, попадая в организм животных, могут влиять на поступление радионуклида. В данных моделях не учитываются и такие факторы, как форма содержания радионуклида в почве и время, прошедшее с момента его депонирования. До Чернобыльских выпадений оценка биодоступности связанных почвой радионуклидов при всасывании в желудке жвачных не проводилась. Некоторые исследования по данному вопросу появились сравнительно недавно. Так, по данным английских ученых, ¹³⁷Cs связанный с частичками почвы в ЖКТ имеет биодоступность 20% от биодоступности из растительности [25], по нашим данным эта величина составляет 13–14% [12].

В первые дни после аварии [13, 20] основной вклад в концентрацию перорально поступивших радиоактивных веществ в организм КРС вносили аэрационно загрязненные растения и корма. При этом у животных, содержащихся на пастбищах, не учитывался вклад радиоактивных изотопов, поступающих в организм в составе частиц загрязненной почвы. По мнению же английских авторов, вклад частиц почвы в загрязнение молока радионуклидами в первый период после радиоактивного загрязнения может достигать 50–60% от общего поступления радиоизотопов с кормом [21–25]: в первый момент после попадания в почву радионуклиды являются более доступными для усвоения растениями, чем в более поздние сроки, когда происходит их фиксация почвенно-поглощающим комплексом. Интенсивность фиксации зависит от физико-химических свойств радионуклидов. Так, для ⁹⁰Sr подвижность в системе почва – растение с течением времени изменяется значительно медленнее, чем для ¹³⁷Cs. В большинстве случаев, при загрязнении почвенного покрова искусственными радионуклидами, их поступление в растения происходит прямо пропорционально содержанию в почве, что подтверждается положительной корреляцией между коэффициентами накопления изотопов в растениях и их концентрацией в почве [13], поэтому будет естественным предположить, что при поступлении радионуклидов из почвенных частиц в организм животных данная закономерность сохраняется.

Цель настоящего исследования – выявить факторы, влияющие на параметры перехода радионуклидов (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr) из почвенных частиц в организм КРС, и установить максимально возмож-

ные величины вклада радионуклидов, поступающих перорально с почвой, в удельную активность молока.

Материалы и методы исследований. Исследования были проведены в 1998–2003 гг. на базе Института радиологии, полевые эксперименты – в экспериментальном хозяйстве НПЦ НАН Беларуси по животноводству «Заречье» Смолевичского района Минской области. При ретроспективном анализе содержания радионуклидов чернобыльского происхождения в молоке КРС за счет поступления в организм животных почвы с пастбища были учтены такие динамические параметры, как плотность загрязнения сельскохозяйственных угодий, количество перорально поступающей к животным почвы, содержание в почве обменных форм и процессы естественного радиоактивного распада, также оценивали влияние интенсивности эксплуатации пастбищных угодий и состояние растительного покрова в течение пастбищного периода на поступление почвенных частиц в организм животных. Оценку количества потребленной коровами почвы проводили по методу Б. Т. Уилкинса, Н. А. Бересфорда с определением стабильного изотопа титана в почве, растительности и кале животных [27].

Результаты и их обсуждение. Мониторинговые наблюдения за концентрацией титана в кале экспериментальных групп животных позволили выявить некоторые закономерности поступления почвенных частиц в организм КРС, связанные с интенсивностью использования пастбищ. У группы наблюдаемых животных на пастбище I фактическая нагрузка была ниже, чем на пастбище II в 2–3 раза. При этом на пастбище I наблюдалось более низкое поступление титана при одинаковой концентрации в почве, чем на пастбище II, что свидетельствует о меньшем количестве заглатываемой животными почвы. Некоторые различия наблюдались и в течение всего пастбищного содержания. Так, в начале, а на пастбище II и в конце, пастбищного периода наблюдалось заметное увеличение поступления почвы в организм КРС при выпасе (рис. 1).

Проведенными исследованиями было установлено, что коэффициенты перехода в системе «почвенная компонента рациона – молоко коров» в отдаленный период аварии на ЧАЭС составили для почвы дерново-подзолистого типа, независимо от дальности радиоактивных выпадений, $0,03 \pm 0,006\%$ по ^{137}Cs и $0,01 \pm 0,002\%$ в отношении ^{90}Sr . Вклад радионуклидов, поступающих в организм лактирующих коров с почвой в количестве 0,5 кг в сутки при выпасе, в удельную активность молока был следующим: для ^{137}Cs – 0,6%, для ^{90}Sr – 0,2% [11]. При этом содержание обменных форм на момент проведения эксперимента составляло в среднем для ^{137}Cs – 12%, для ^{90}Sr – 56%. По результатам данных экспериментов был сделан прогноз ожидаемого содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в молоке КРС, обусловленный вкладом почвы, поступающей с рационом, при различной плотности радиоактивного загрязнения сенокосно-пастбищных угодий. Расчет был проведен с учетом прямо пропорциональной зависимости накопления радионуклидов в молоке от содержания их в рационе при уровнях радиоактивного загрязнения до 1480 кБк/м^2 .

Анализ выполнен при условии выпаса животных на радиоактивно загрязненных угодьях, где допускается сельскохозяйственная деятельность. Кратность увеличения удельной активности молока за счет почвенной компоненты рациона при изменении плотности радиоактивного за-

грязнения территории от 37 до 555 кБк/м^2 составила для ^{137}Cs около 7 раз, для ^{90}Sr при изменении плотности радиоактивного загрязнения от $18,5$ до 111 кБк/м^2 – около 4 раз. При этом максимальные значения не превысили РДУ содержания ^{137}Cs в молоке.

При формировании уровней удельной активности молока в пастбищный период вклад почвенной компоненты в содержание радионуклидов в продукции может изменяться. При этом важную роль в данном процессе играет содержание почвы в рационе КРС, которое может варьироваться в зависимости от разных факторов (степени

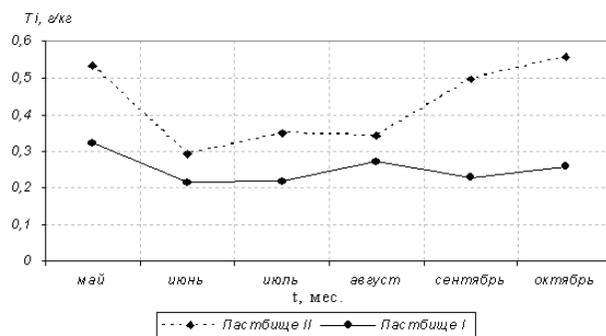


Рис. 1. Динамика содержания Ti в кале КРС на изучаемых пастбищах

окультуренности пастбища, сроков использования, ботанических видов пастбищной растительности, климатических и погодных условий и т. д.). На основании этого был сделан прогноз изменения вклада почвы в общую активность рациона и удельную активность молока при различной доле почвы в пастбищном рационе, который показал, что вклад почвы в общую активность рациона и удельную активность молока возрастает в зависимости от содержания ее в суточном рационе: при увеличении поступления почвы в рацион от 0,5 до 3 кг в сутки вклад в общую активность рациона возрастает в 3 раза по ^{137}Cs и 5,3 раза по ^{90}Sr , в удельную активность молока – 5 раз по ^{137}Cs и 5,8 раза по ^{90}Sr .

Для начального периода техногенной аварии, связанной с выбросом в окружающую среду радиоактивных изотопов, характерно высокое содержание в почве обменных форм радионуклидов. Это способствует значительному увеличению вклада почвенных частиц, перорально поступающих к КРС во время выпаса, в удельную активность молока, что необходимо учитывать при прогнозе загрязнения животноводческой продукции.

Поскольку основная доля при поступлении радионуклидов в растениеводческую продукцию определяется обменными формами содержания в почве, то и вклад радионуклидов почвенных частиц в загрязнение продукции животноводства также будет зависеть от содержания в ней обменных форм. Следовательно, при прогнозировании поступления техногенных радионуклидов в растительность и продукцию животноводства необходимо учитывать количество в почве обменных форм, являющихся основным фактором при формировании уровней радиоактивного загрязнения.

Анализ литературных данных [1–10, 14–19] показал, что при глобальных выпадениях количество обменного цезия на дерново-подзолистых почвах находится в пределах 5–15%. В первый год после аварии на ЧАЭС произошло повышение содержания обменных форм в среднем до 26,1% и в 1987 г. достигло максимальных значений – 33,9%. В дальнейшем наблюдался экспоненциальный спад количества обменного цезия, в настоящее время достигнув величин, характерных для глобальных выпадений (рис. 2).

В отношении ^{90}Sr не наблюдается четкой зависимости между обменными формами, содержащимися в почве в различные промежутки времени, что объясняется его нестабильностью в почвенно-поглощающем комплексе (рис. 3).

Большое влияние на поведение радионуклидов в почве и биологических цепях оказывают их химические свойства. В отличие от цезия стронций в почве биологически более подвижен, что

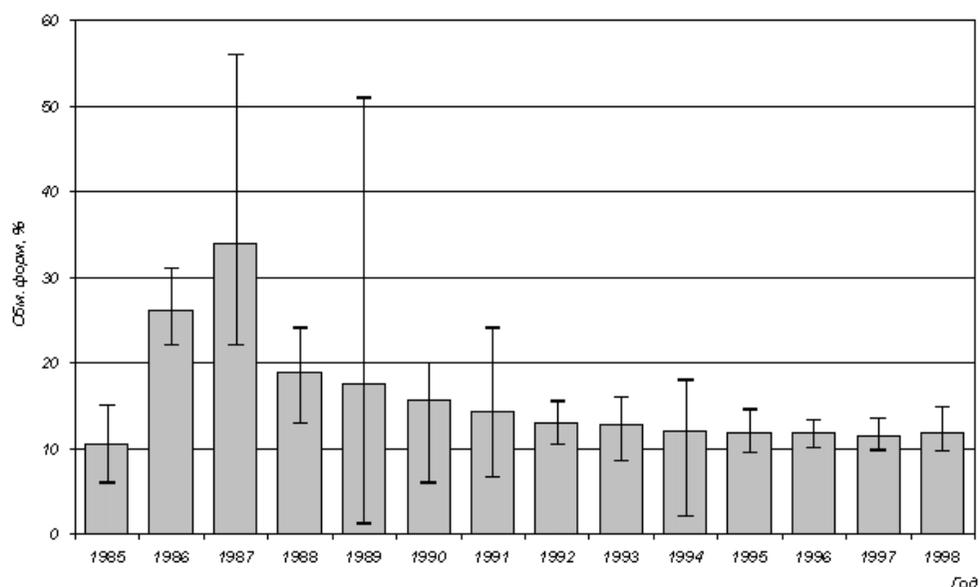


Рис. 2. Содержание обменных форм ^{137}Cs в дерново-подзолистой почве ближнего следа чернобыльских выпадений [1–10, 14–19]

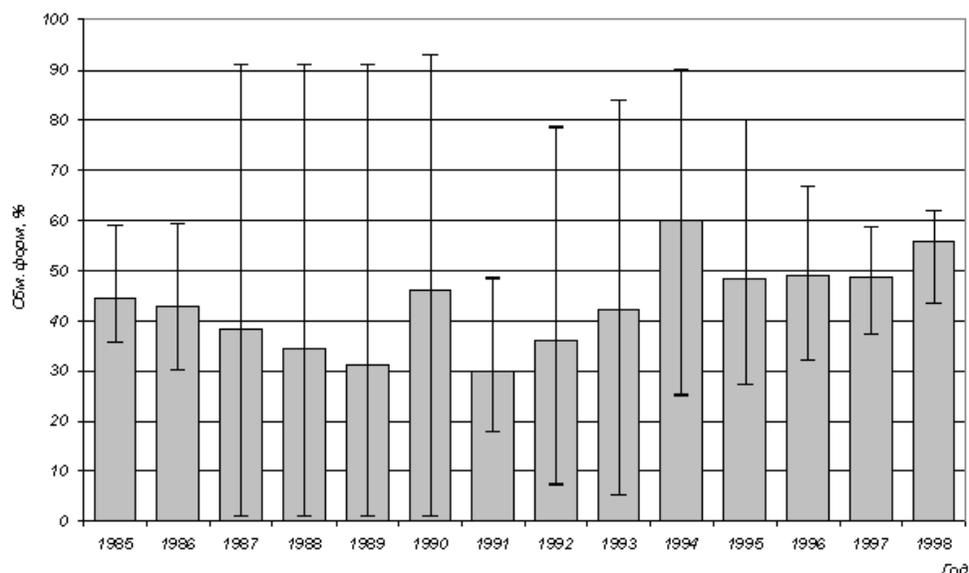


Рис. 3. Содержание обменных форм ⁹⁰Sr в дерново-подзолистой почве ближнего следа чернобыльских выпадений [1–10, 14–19]

связано с его способностью легче замещаться другими катионами почвенно-поглощающего комплекса. Поэтому в отношении ⁹⁰Sr наблюдается, даже в пределах одного года, сильная вариабельность показателей обменных форм.

Наши расчеты показывают, что при повышенном содержании в почве количества обменных форм ¹³⁷Cs (34%) (что характерно для первых лет после Чернобыльской катастрофы) величина коэффициента перехода (КП) цезия из почвенных частиц в молоко в 3,5 раза больше относительно отдаленного периода после катастрофы (1998–1999 гг.) и может составлять 0,1%.

В отношении ⁹⁰Sr не наблюдается четкой зависимости в изменении содержания обменных форм в почве после чернобыльской катастрофы. Имеется лишь недостоверная тенденция к увеличению с течением времени, прошедшего с момента аварии. При этом естественная вариабельность содержания обменных форм в почве в течение одного года на одном и том же типе почв может составлять от 1 до 93%. Содержание в почве количества обменных форм ⁹⁰Sr на уровне 93% приводит к увеличению КП стронция из почвенных частиц в молоко в 2 раза и может достигать 0,02%.

При анализе возможных величин почвенного вклада необходимо также учитывать естественные процессы, связанные с физическим распадом радионуклидов с течением времени. Наши расчеты показали, что за счет естественных процессов радиоактивного распада снижение почвенного вклада в удельную активность молока является незначительным и будет определяться физическим периодом полураспада.

Таким образом, содержание радионуклида в молоке при пастбищном содержании описывается следующим выражением:

$$A_M = A_{\text{п}} \left(\sum_i^n (\text{КП}_{\text{п,р}i} \text{КП}_{\text{р,м}i} m_i) + \text{КП}_{\text{п,м}} m_n \right), \quad (1)$$

где A_M – содержание радионуклида в молоке; $A_{\text{п}}$ – удельная активность почвы, Бк/кг; i – виды используемых кормов; $\text{КП}_{\text{п,р}}$ – коэффициент перехода радионуклида из почвы в i -й корм, (Бк/кг)/(Бк/м²); m_i – количество потребленного животным i -го корма в сутки, кг; $\text{КП}_{\text{р,м}}$ – коэффициент перехода радионуклида из рациона в молоко, %; $\text{КП}_{\text{п,м}}$ – коэффициент перехода радионуклида из потребленной животным почвы в молоко, %; m_n – количество потребленной животным почвы в сутки, кг.

Учитывая рассмотренные выше изменяющиеся факторы содержания животных и условия нахождения радионуклидов в почве, можно констатировать, что максимально возможная величина вклада поступающих в организм КРС загрязненных радионуклидами почвенных частиц в удельную активность молока для ^{137}Cs составляет 10–13%, для ^{90}Sr – 5%.

Ретроспективный анализ показал, что вклад почвы, поступающей в организм КРС при выпасе, в удельную активность молока коров по ^{137}Cs и ^{90}Sr зависит от доли почвенной компоненты в суточном рационе, уровня содержания в почве обменных форм радионуклидов, естественных процессов радиоактивного распада.

В начальный период радиационной аварии при определении дозовых нагрузок на выпасаемых животных, обусловленных короткоживущими изотопами (например ^{131}I), учитывается только поступление их с поверхностно загрязненной пастбищной растительностью. Поступление же данных радионуклидов в составе загрязненной почвы в организм выпасаемых животных может иметь гораздо большее значение, что необходимо учитывать при прогнозе и реконструкции доз облучения животных и загрязнении животноводческой продукции.

Заключение. В настоящее время, когда доля обменных форм радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr) чернобыльского происхождения в почвах соответствует доаварийным уровням, вклад почвенной компоненты в удельную активность молока незначителен. Утверждение зарубежных исследователей о 50–60%-ном вкладе почвенных радионуклидов в молоко КРС при выпасе, возможно, имеет место для конкретных условий (гористой местности, островного климата, свежих радиоактивных выпадений), поскольку на величину данного вклада может повлиять целый ряд технологических и природных факторов (система выпаса, тип почвы, селекционные особенности животных, вид и состояние пастбищ, климатические факторы и т. д.).

Литература

1. А к с е н о в а С. П., С а н ж а р о в а Н. И., К у з н е ц о в В. К. Изменение содержания обменных форм ^{137}Cs в почвах Белорусского Полесья при проведении агрохимических мероприятий // Всесоюзная конференция «Проблемы ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в агропромышленном производстве – пять лет спустя: итоги, проблемы и перспективы: Тез. докл. Обнинск, 1991. Т. 1. С. 93–94.
2. А н и с и м о в В. С., С а н ж а р о в а Н. И., А л е к с а х и н Р. М. Динамика форм ^{137}Cs в почвах Белорусского Полесья после аварии на ЧАЭС // Всесоюзная конференция «Проблемы ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в агропромышленном производстве – пять лет спустя: итоги, проблемы и перспективы: Тез. докл. Обнинск, 1991. Т. 1. С. 5–6.
3. Б о б о в н и к о в а Ц. И., К о н о п л е в А. В., М а х о н ь к о К. П. и др. Химические формы радионуклидов в атмосферных выпадениях после Чернобыльской аварии и их трансформация в почве // Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере: Тез. докл. IV конф. науч. совета при ГЕОХИ АН СССР по прогр. «АЭС-ВО». Гомель, 1990. С. 34.
4. Б о н д а р ь Ю. И., И в а н о в Ю. А., О з о р н о в А. Г. Оценка относительной биологической доступности цезия-137 в выпадениях и общей биологической его доступности в почвах на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению // Всесоюзная конференция «Проблемы ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в агропромышленном производстве – пять лет спустя: итоги, проблемы и перспективы: Тез. докл. Обнинск, 1991. Т. 1. С. 14–15.
5. Б о н д а р ь Ю. И., С и д е л ь ц е в а М. А., С у т ь м о в а В. В. Распределение изотопов цезия и стронция по формам в радиоактивно загрязненной почве // Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере: Тез. докл. IV конф. науч. совета при ГЕОХИ АН СССР по прогр. «АЭС-ВО». Гомель, 1990. С. 35.
6. Г р е б е н щ и к о в а Н. В., С а м у с е в Н. И., Н о в и к А. А. Поведение радионуклидов Cs в дерново-подзолистых почвах Гомельской области // III Всесоюз. конф. по с.-х. радиол.: Тез. докл. Обнинск, 1990. Т. 1. С. 18–19.
7. Д а в ы д о в Ю. П., В о р о н и к Н. И., Ш а т и л о Н. Н., Л у ч к и н Б. Г. Изучение форм нахождения радионуклидов в почвах // Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере: Тез. докл. IV конф. науч. совета при ГЕОХИ АН СССР по прогр. «АЭС-ВО». Гомель, 1990. С. 39.
8. Е г о р о в а В. А. Сравнительная характеристика подвижности ^{90}Sr в разных почвах // II Всесоюз. конф. по с.-х. радиол.: Тез. докл. Обнинск, 1984. Т. 1. С. 104.
9. И в а н о в Ю. А., Б о н д а р ь Ю. И., О р е ш и ч Л. А. и др. Использование метода изотопного разбавления для оценки динамики подвижных форм в почве цезия-137 выпадений выброса ЧАЭС // Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере: Тез. докл. IV конф. науч. совета при ГЕОХИ АН СССР по прогр. «АЭС-ВО». Гомель, 1990. С. 146.
10. И в а н о в Ю. А., Б о н д а р ь Ю. И., О з о р н о в А. Г., О р е ш и ч Л. А. Оценка динамики подвижных форм цезия-137 выпадений выброса ЧАЭС в почвах с использованием метода изотопного разбавления // III Всесоюз. конф. по с.-х. радиол.: Тез. докл. Обнинск, 1990. Т. 1. С. 15–17.

11. К а л и н и ч е н к о С. А. Вклад депонированных в почве радионуклидов в загрязнение молока ^{90}Sr , ^{137}Cs при пастбищном содержании крупного рогатого скота // Молодежь и экологические проблемы современности: Материалы III науч.-практ. конф. молодых ученых. Гомель, май 1999. Гомель, 1999. С. 62–63.
12. К а л и н и ч е н к о С. А. Оценка биодоступности радионуклидов из почвы в организм крупного рогатого скота *in vitro* методом // Радиационная биология. Радиоэкология. 2002. Т. 42. № 3. С. 341–344.
13. К о р н е е в П. А., С и р о т к и н А. Н. Основы радиоэкологии сельскохозяйственных животных. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 184.
14. Л о щ и л о в Н. А., И в а н о в Ю. А., О р е ш и ч Л. А. и др. Распределение ^{137}Cs выброса ЧАЭС в компонентах луговых фитоценозов и факторы, его определяющие // Радиоэкологические и экономико-правовые аспекты землепользования после аварии на Чернобыльской АЭС: Материалы науч. конф. Киев, 27–30 марта 1991. Ч. 1. Киев, 1991. С. 171–175.
15. М а р т ю ш о в В. З., С м и р н о в Е. Г., Ч е р т к о в а Т. П. Формы состояния стронция-90 в дерново-подзолистых почвах 30-км зоны ЧАЭС и биологическая доступность // Всесоюз. конф. «Проблемы ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в агропромышленном производстве – пять лет спустя: итоги, проблемы и перспективы: Тез. докл. Обнинск, 1991. Т. 1. С. 68–69.
16. М и х а й л о в с к а я Л. Н., М о л ч а н о в а И. В. Формы радионуклидов и их вертикальное распределение в почвах // I Всесоюз. конф. по с.-х. радиол.: Тез. докл. М., 1979. С. 145–146.
17. П е т р я е в Е. П., О в с я н н и к о в а С. В., Л ю б к и н а И. Я. и др. Основные тенденции в изменении состояния радионуклидов в почвах Белоруссии после Чернобыльской аварии // Всесоюз. конф. «Проблемы ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в агропромышленном производстве – пять лет спустя: итоги, проблемы и перспективы: Тез. докл. Обнинск, 1991. Т. 1. С. 39–40.
18. П е т р я е в Е. П., О в с я н н и к о в а С. В., С о к о л и к Г. А. и др. Изучение миграционных форм радионуклидов в почвах методом последовательного выщелачивания // Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере: Тез. докл. IV конф. науч. совета при ГЕОХИ АН СССР по прогр. «АЭС-ВО». Гомель, 1990. С. 55.
19. П е т р я е в Е. П., О в с я н н и к о в а С. В., С о к о л и к Г. А. и др. Об изменении форм нахождения радионуклидов на загрязненной территории БССР // Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере: Тез. докл. IV конф. науч. совета при ГЕОХИ АН СССР по прогр. «АЭС-ВО». Гомель, 1990. С. 54.
20. Я г о д и н Б. А., С м и р н о в П. М., П е т е р б у р г с к и й А. В. и др. Агрохимия / Под ред. Б. А. Ягодина. М.: Агропромиздат, 1989. С. 117–130.
21. B e r e s f o r d N. A., H o w a r d B. J. The importance of soil adhered to vegetation as a source of radionuclides ingested by grazing animals // The Science of the Total Environment. 1991. Vol. 107. P. 237–254.
22. G r e e n N., D o d d N. J. The Uptake of radionuclides from inadvertent consumption of soil by grazing animals // The Science of Total Environment. 1988. Vol. 69. P. 367–377.
23. G r e e n N., W i l k i n s B. T., H a m m o n d D. J. The Transfer of ^{137}Cs and ^{90}Sr along the soil-pasture-cows milk pathway in an area of land reclaimed from the sea. // J. Environ. Radioactivity. 1994. Vol. 23. P. 151–170.
24. C r o u t N. M. J., B e r e s f o r d N. A., H o w a r d B. J. Does soil adhesion matter when predicting radiocaesium transfer to animals? // J. Environ. Radioactivity. 1993. Vol. 20. P. 201–212.
25. C o o k e A. I., G r e e n N., R i m m e r D. L. et al. Development of an *in vitro* method to assess the availability of soil-associated radionuclides for uptake by ruminants // J. Environ. Radioactivity. 1995. Vol. 28, N 2. P. 191–207.
26. S u m e r l i n g T. J., D o d d N. J., G r e e n N. The transfer of ^{90}Sr and ^{137}Cs to milk in a dairy herd grazing near a major nuclear installation // The Science of the Total Environment. 1984. Vol. 34. P. 57–72.
27. W i l k i n s B. T., C o o k e A. I., G r e e n N. et al. The of an *in vitro* method to Assess the availability of soil-associated radionuclides for uptake by ruminants // Radiation Protection Dosimetry. 1997. Vol. 69. N 2. P. 111–116.

S. A. KALINICHENKO, V. S. AVERIN

FORECAST OF THE RADIONUCLIDE CONTENT IN THE CATTLE MILK DUE TO THE SOIL COMPONENT IN THE ANIMAL DIET

Summary

In the article the effect of *per oral* intake of pasture soil into the cattle organism on the radionuclide specific activity in milk is considered. A forecast is given as for maximum levels of the soil consumption resulting in the milk contamination with radionuclides, which consider such dynamic parameters as deposition levels of arable lands, the amount of soil consumed by animals, the soil content of exchange forms of ^{137}Cs , ^{90}Sr as well as processes of natural radioactive decay.