DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-6-17
УДК: 546.15(438+437):621.039.586(477.41)

Верификация радиоэкологической модели на инструментальных данных удельной активности ^{131}I в траве в Мазовии и Богемии после аварии на ЧАЭС (по материалам «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS)

О.К. Власов[1], П. Краевский[2], И.А. Звонова[3], И. Малатова[4], М. Бартускова[5], Н.В. Щукина[1], С.Ю. Чекин[1], К.А. Туманов[1]

[1] Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Научного медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия
[2] Центральная лаборатория радиологической защиты, Варшава, Польша
[3] Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
[4] Национальный институт радиационной защиты, Прага, Чехия
[5] Филиал Национального института радиационной защиты, Острава, Чехия

Выполнен анализ инструментальных данных «Пражского» и «Варшавского» сценариев о динамике удельных активностей ^{131}I в траве. Проведена реконструкция динамики удельных активностей ^{131}I в траве в населенных пунктах с ее измерениями. Реконструкция выполнена по трем моделям: прямого расчета по входным данным сценариев, однородного и неоднородного радиоактивного облака. Фактические плотности выпадений ^{137}Cs в местах отбора травы в среднем больше плотностей выпадения, реконструированных по модели прямого расчета, в 2,9 раза для Праги и в 2 раза для Варшавы. Эффективные осадки за время основных выпадений в местах отбора проб травы, реконструированные по модели однородного облака, в 3–4 раза больше, чем на ближайших к ним метеостанциях. Выявлен реалистический сценарий входных данных, приводящий к оптимальному согласию расчетных и инструментальных данных. Модели прямого расчета и однородного облака дают практически совпадающие между собой результаты и приводят к лучшему согласию с инструментальными данными, чем модель неоднородного облака; расчетные и инструментальные данные показывают значимое уменьшение удельной активности ^{131}I в траве после окончания основных выпадений за счет ее смыва с поверхности травы сильными продолжительными осадками через 13 и 19 суток после аварии в Мазовии и через 30 и 35 суток в Богемии. Размахи среднегеометрических значений и стандартных среднегеометрических отклонений отношений расчет/инструментальные данные составляют 0,8–1,1 в Мазовии и 1,8–1,9 в Богемии. Регрессионные зависимости диаграмм рассеивания расчетные/инструментальные данные практически параллельны диагонали с угловым коэффициентом, равным 0,94 для однолетней и 0,86 для многолетней травы.

Ключевые слова: *авария на ЧАЭС, радиоэкологическая модель, проект МАГАТЭ EMRAS, «Пражский» и «Варшавский» сценарии, верификация модели, удельные активности ^{131}I в траве, погодные условия, плотности выпадения ^{137}Cs, неопределенности модели.*

Введение

Радиоэкологические модели разрабатываются, главным образом, для целей реконструкции радиологических последствий крупных радиационных аварий с выбросом радиоактивных продуктов в атмосферу и переноса их на большие расстояния, когда не хватает данных прямых измерений для оценки радиационного воздействия аварии на человека, а также для прогнозирования радиологических последствий по результатам первичного мониторинга радиационной обстановки на начальном этапе аварии [1–4]. Всплеск интереса к радиоэкологическим моделям возник после аварии на Чернобыльской АЭС. Материалом для их создания и средством их верификации являлись результаты измерений проб окружающей среды. В начале 2000-х гг. МАГАТЭ инициировало международный проект «Радиоэкологическое моделирование в интересах радиационной безопасности (Environmental Modelling for Radiation Safety – EMRAS)», в рамках которого было

Звонова Ирина Александровна
Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.
Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ir_zv@bk.ru

предложено провести международное сличение и верификацию моделей, предложенных разными странами, для оценки доз облучения населения за счет выпадений радионуклидов ^{137}Cs и ^{131}I после аварии на Чернобыльской АЭС [5–8]. Полной картины последовательных измерений транспорта радионуклидов по экологической цепочке не удалось выполнить ни в одном локальном месте ни в одной стране. Поэтому при создании и последующей верификации радиоэкологических моделей анализировались экспериментальные данные, полученные для отдельных элементов экологической цепочки в разных местностях и странах. В данной работе использовались результаты измерений проб окружающей среды, представленные в рамках «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS.

Одной из задач «Пражского» сценария было проведение исследований эффективности применения специальных методов ведения сельского хозяйства, методов подготовки кормов для молочного скота с целью уменьшения активности ^{131}I в молоке и тем самым снижения доз внутреннего облучения щитовидной железы населения. В «Варшавском» сценарии ставилась основная задача оценить эффективность йодной профилактики жителей, проведенной в Польше.

В отличие от целей сценариев EMRAS, авторами планируется проведение исследований транспорта наиболее значимых радионуклидов ^{137}Cs и ^{131}I по трофической цепочке: атмосфера – почва – растительность – организм сельскохозяйственных животных – молоко – человек с целью оценки доз внутреннего облучения щитовидной железы и всего тела жителей после аварии на ЧАЭС. Решение этой задачи распадается на ряд этапов, каждый из которых является темой отдельной статьи.

Отличительной особенностью баз данных «Пражского» и «Варшавского» сценариев является то, что измерения разных параметров проводились в разных местах: координаты метеостанций (данные об осадках и температурах), мест отбора проб воздуха, растительности, молока, как правило, не совпадали друг с другом. Поэтому для проведения радиоэкологических исследований с использованием имитационной модели сначала нужно было выполнить работу по созданию баз полного комплекта взаимно согласованных входных данных: динамики удельных объемных активностей и форм существования радионуклидов ^{137}Cs и ^{131}I в атмосфере, осадков в период выпадений и плотностей выпадения ^{137}Cs в населенных пунктах (НП).

Эти исследования были выполнены в первой работе данной серии [9]. В ней приводятся результаты создания такой базы радиоэкологических данных. Были рассмотрены две гипотезы формирования радиоактивного загрязнения местности: 1) пространственно однородное радиоактивное облако с неоднородными осадками в НП данного региона («мокрые» выпадения), включая нулевые осадки («сухие» выпадения); 2) неоднородное облако с одинаковыми осадками во всех НП данного региона.

В настоящей работе продолжается исследование этих двух гипотез на основе инструментальных данных о загрязнении растительности, представленных в «Пражском» и «Варшавском» сценариях проекта МАГАТЭ EMRAS.

Цель исследования – проведение верификации радиоэкологической модели на основе инструментальных данных динамики активностей ^{131}I в травяной растительности с выявлением правдоподобных и реалистических сценариев, приводящих к оптимальному согласию расчетных и инструментальных данных; оценка неопределенностей радиоэкологической модели на этапе реконструкции динамики активностей ^{131}I в травяной растительности для последующего их использования в исследованиях загрязнения зеленого корма и молока молочных коров.

Материалы и методы

Исследование динамики процессов загрязнения травяной растительности после аварии на ЧАЭС в Мазовии и Богемии проводится с использованием агроэкологического блока имитационной радиоэкологической модели [10]. Блок представляет собой систему линейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику выпадений радионуклидов ^{131}I и ^{137}Cs из атмосферы на землю и растительность, динамику удельных активностей травяной, дикорастущей и культурной растительности кормовых и продовольственных сельскохозяйственных культур с учетом роста их биомасс. Динамика биомасс рассчитывается по данным о погодных условиях в год аварии. Входная информация модели состоит из следующего набора динамических параметров: удельные объемные активности и формы нахождения радионуклидов в атмосфере, среднесуточные температуры воздуха с начала вегетационного периода, осадки в период и после радиоактивных выпадений, урожайность сельскохозяйственных культур в год аварии. Набор этих данных вместе с данными о плотностях выпадения ^{137}Cs в НП представлены в большей или меньшей степени в сценариях проекта EMRAS [5–7].

Реконструкция удельных активностей ^{131}I в траве проводилась по трем моделям расчетов:

Модель 1 – прямой расчет: инструментальные данные о динамике удельных объемных активностей ^{131}I и ^{137}Cs в атмосфере и метеоданные об осадках на метеостанциях, ближайших к НП, где проводился отбор проб травы.

Модель 2 – неоднородное облако с одинаковыми осадками во всех НП региона: инструментальные данные о динамике удельных объемных активностей ^{131}I и ^{137}Cs в атмосфере в период основных выпадений для региона в целом пересчитывались к данным над НП с коэффициентом Kq_{cloud} по соотношению (1):

$$Q_{\mathrm{m}2}^{Cs,I}(t) = Q_{instr}^{Cs,I}(t) * Kq_{cloud}; \theta_0 \le t \le \theta_1, \quad (1)$$

где Q_{instr} и Q_{m2} – инструментальные данные удельных объемных активностей ^{137}Cs и ^{131}I соответственно в атмосфере в период основных выпадений (рис.1); θ_0 и θ_1 – даты начала и окончания выпадения осадков ($\theta_0 \le t \le \theta_1$) для региона в целом и пересчитанные для НП, кБк/м^3:

$$Kq_{cloud} = \frac{\sigma_{rec}}{\sigma_{dep}}. \quad (2)$$

Здесь σ_{dep} и σ_{rec} – измеренные и рассчитанные по модели 1 прямого расчета плотности выпадения ^{137}Cs в НП (рис. 2), кБк/м^2.

Модель 3 – однородное облако: инструментальные данные о динамике удельных объемных активностей ^{137}Cs в атмосфере и расчетные эффективные осадки за пери-

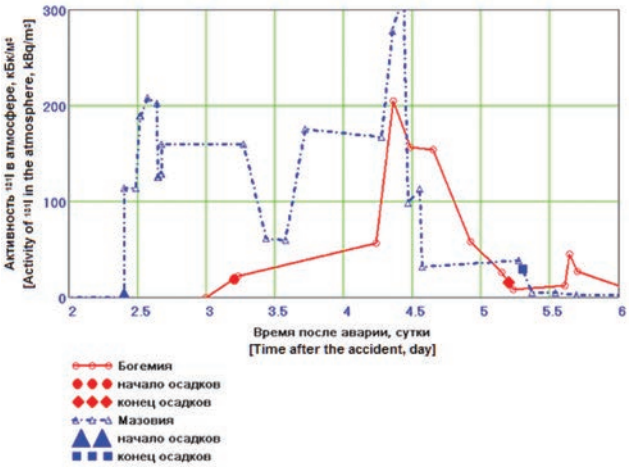


Рис. 1. Динамика удельных активностей ^{131}I в атмосфере Мазовии и Богемии и принятые для расчетов времена начала θ_0 и окончания θ_1 осадков

[**Fig. 1.** Dynamics of the specific activity of ^{131}I in the atmosphere of Mazovia and Bohemia and times of beginning and end of precipitation accepted for calculations]

● – R_{met}(0,8 mm)→σ_{rec} (1,7 кБк/м^2); ▲ – σ_{dep} (3,4 кБк/м^2)→R_{rec}(3 mm)

Рис. 2. Зависимости плотностей выпадения ^{137}Cs от осадков за период основных выпадений с примерами расчетов для метеостанции Warszawa Obserw. Astr в Варшаве. Locality – населенный пункт, место в г. Варшава; Meteo_station – ближайшая к населенному пункту метеостанция; R_{met} и R_{rec} – осадки по метеоданным и реконструированные по модели однородного облака

[**Fig. 2.** Dependences of on rains for the period of major precipitation with examples of calculations for the weather station Warszawa Observer. Astr. Locality – locality (place in the city); Meteo_station – the nearest weather station to this locality; R_{met} and R_{rec} – rain at meteodata and reconstructed model of a homogeneous cloud]

од основных выпадений, реконструированные по плотностям выпадений ^{137}Cs в НП и расчетным зависимостям плотностей выпадения ^{137}Cs от осадков (см. рис. 2).

Результаты и обсуждение

В «Пражском» сценарии инструментальные данные о динамике удельных активностей ^{131}I в траве приведены для населенного пункта Praha – Vinohrady с плотностью выпадения ^{137}Cs 7 кБк/м^2 и эффективными осадками за период основных выпадений, реконструированными по модели однородного облака, – неоднородные осадки, равные 6,3 мм. За этот же период времени на метеостанции Praha – Karlov, ближайшей к этому НП и расположенной на расстоянии от него в 3,8 км, выпало, по метеоданным, 2,1 мм осадков. Измерения активности травы проводились в период с 14-х по 53-е сутки после аварии на ЧАЭС. Кроме того, в «Пражском» сценарии представлены данные измерений удельных активностей ^{131}I в траве для г. Братислава в Словакии. Измерения проводились с 5-х по 20-е сутки после аварии. Интересно отметить, что эти данные, несмотря на большую удаленность Праги от Братиславы, образуют одну и ту же временную зависимость и взаимно дополняют друг друга (рис. 3). Этот факт был использован в работе [9] при обосновании предпо-

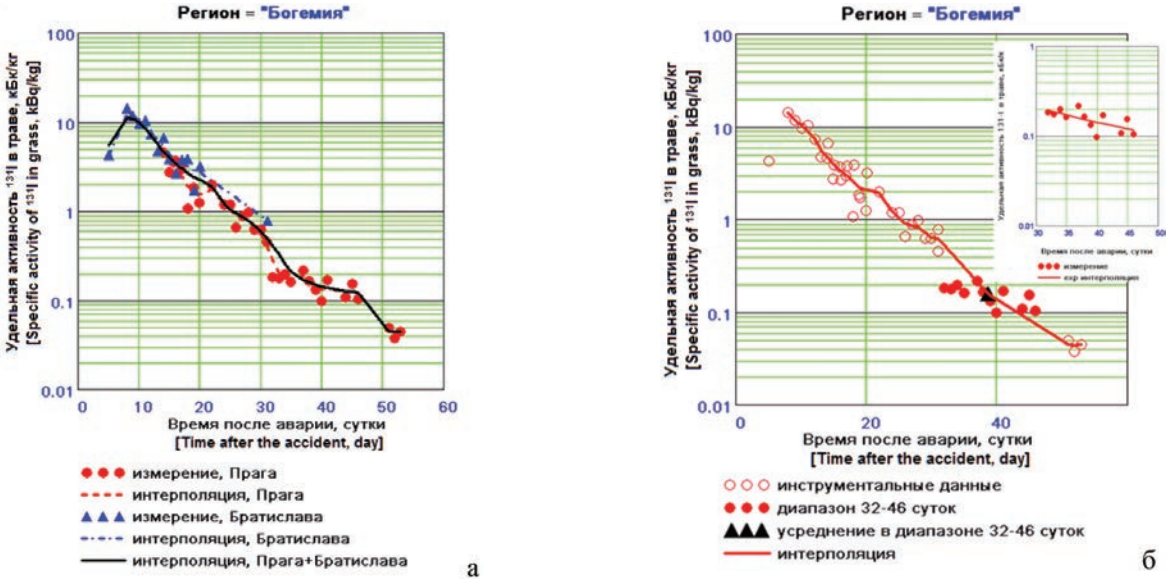


Рис. 3. Динамика удельной активности ^{131}I в траве: а) в Праге и Братиславе; б) объединенные инструментальные данные для Богемии

[**Fig. 3.** The dynamics of specific activity of ^{131}I in grass: a) in Praha and Bratislava b) – united instrumental data for Bohemia]

чтительности использования модели однородного облака. Отметим также, что скорость экспоненциального уменьшения объединенных инструментальных данных для региона Богемии на временном участке от 32 до 46 суток после аварии, равная 0,04 сут$^{-1}$ (вставка на рисунке 3б), оказалась меньше скорости распада ^{131}I, равной 0,086 сут$^{-1}$. С учетом этого, при дальнейшей статистической обработке инструментальных данных использовалось их усредненное значение в диапазоне 32–46 суток, отмеченное на рисунке 3б треугольником.

В «Варшавском» сценарии (регион Мазовия) данные измерений удельной активности ^{131}I в траве были приведены для образцов травы, отобранных в Варшаве на метеостанции Warszawa Obserw. Astr. с плотностью выпадения ^{137}Cs 3,3 кБк/м^2. По данным этой метеостанции, здесь за период основных выпадений выпало 0,8 мм осадков.

Отметим, что скорость экспоненциального уменьшения инструментальных данных в Мазовии оказалась в 3 раза больше, чем в Богемии (рис. 4).

Выполненный для Мазовии тестовый расчет с фактической скоростью самоочищения травы 0,34 сут$^{-1}$ (рис. 5) показал вполне удовлетворительное согласие расчетных и инструментальных данных как по средней величине отношения расчет/измерение (μi, i – модели расчета), так и по близости углов наклона прямых к диагонали регрессии на диаграмме их рассеивания β1 (рис. 5).

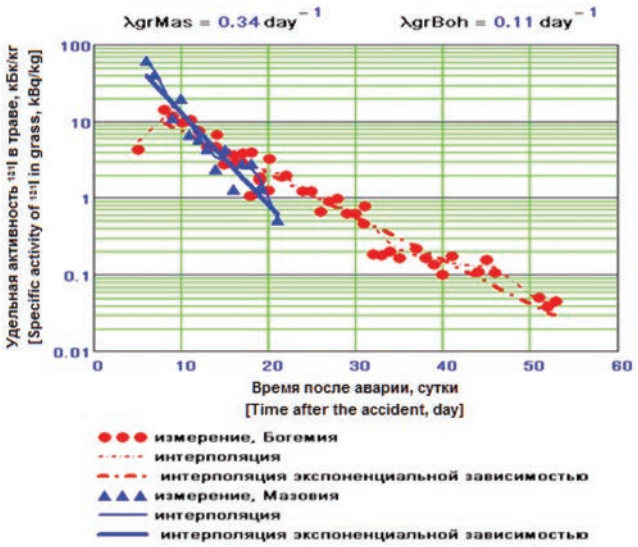


Рис. 4. Динамика удельной активности ^{131}I в траве Мазовии и Богемии.
λgrMas и λgrBoh – скорости экспоненциального уменьшения удельной активности ^{131}I в траве Мазовии и Богемии
[**Fig. 4.** The dynamics of specific activity of ^{131}I in grass in Masovia and Bohemia
λgrMas and λgrBoh – rates of exponential decrease of specific activity ^{131}I in grass of Masovia and Bohemia]

Динамика реконструированных удельных активностей ^{131}I в свежей траве в Богемии и Мазовии для всех 3 моделей расчета, данные об осадках на ближайших метеостанциях, удельной объемной активности ^{131}I в атмосфере и плотности сырой биомассы травы представлены на рисунке 6.

Расчетные радиоэкологические данные для мест измерения травы вместе со статистическими параметрами отношения расчетных к инструментальным данным представлены в таблице.

Гистограмма распределения отношения расчетных данных к инструментальным данным удельной активности ^{131}I в траве Богемии для модели прямого расчета представлена на рисунке 7.

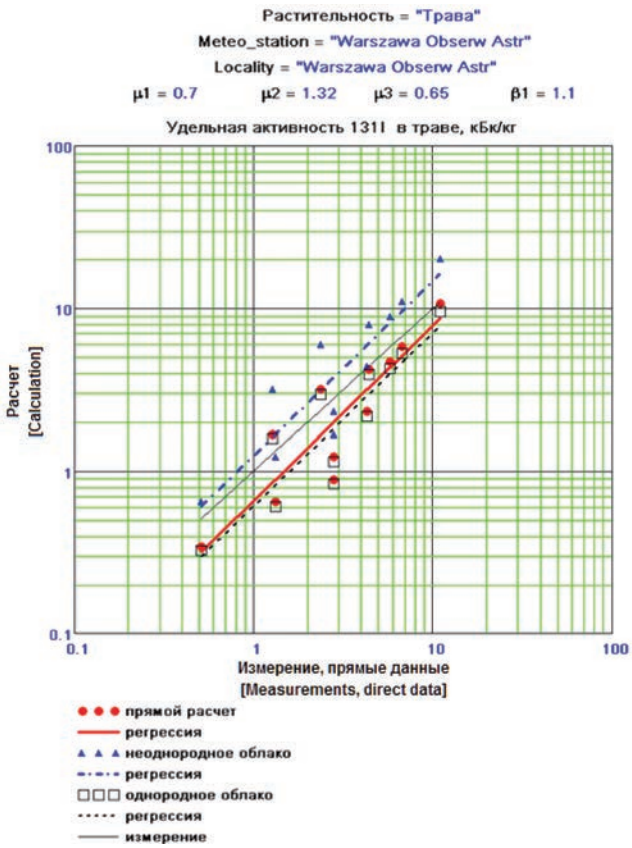


Рис. 5. Диаграммы рассеивания, скорректированные расчетные – инструментальные данные удельных активностей ^{131}I в траве Мазовии
[**Fig. 5.** The scatterplots adjusted the estimated and instrumental data ^{131}I specific activities in the grass in Mazovia]

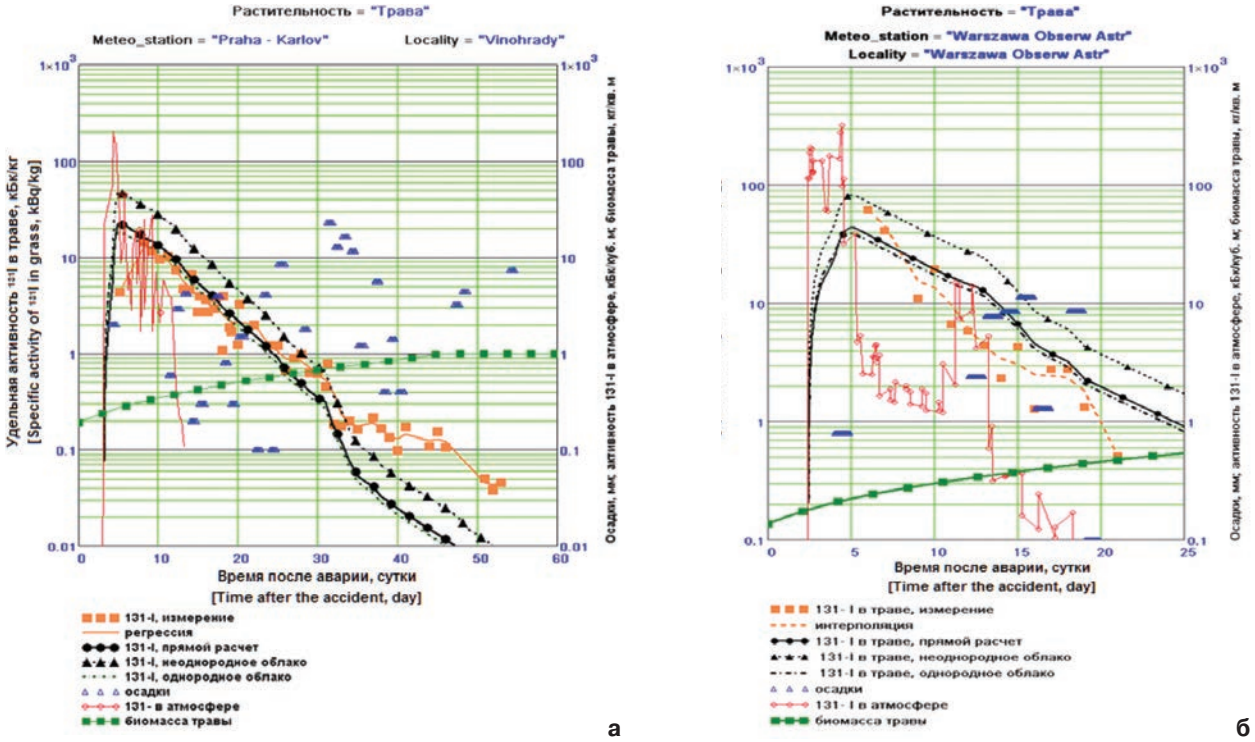


Рис. 6. Динамика удельной активности ^{131}I в свежей траве, удельной объемной активности ^{131}I в атмосфере, осадков и плотности сырой биомассы травы в Богемии (а) и Мазовии (б)
[**Fig. 6.** Dynamics of ^{131}I specific activity in wet grass, ^{131}I specific volume activity in the atmosphere, rains and wet grass biomass of Bohemia (a) and Mazovia (b)]

Таблица

Радиоэкологические данные для мест измерения травы и статистические параметры отношения расчетных к инструментальным данным

[Table

Radioecological data for the measurement of grass and statistical parameters of the ratio of calculated to instrumental data]

Регион [Region]	Мазовия [Mazovia]	Богемия [Bohemia]
Метеостанция [Meteorological station]	Warszawa Obserw Astr	Praha – Karlov
Населенный пункт [Settlement]	Warszawa Obserw Astr	Vinohrady
Коэффициент пересчета удельных активностей ^{131}I в модели неоднородного облака Kq_{cloud} [Conversion factor of ^{131}I specific activity in models of inhomogeneous clouds]	1,89	2,1
Плотность выпадения ^{137}Cs, кБк/м^2 [^{137}Cs fallout density, kBq/m^2]		
Фактическая [Actual]	3,26	6,97
Прямой расчет [Direct calculation]	1,73	3,32
Неоднородное облако [Heterogeneous cloud]	3,26	6,97
Однородное облако [Homogeneous cloud]	3,35	7,11
Осадки за период основных выпадений, мм [A rain during the period of main fallout, mm]		
Данные ближайшей к НП метеостанции [Data of the nearest weather station to this locality]	0,8	2,05
Эффективные в НП [Effective in the settlement]	3	6,17
Среднегеометрическое значение отношения данных (расчет/измерение) [A geometric mean value of the ratio data (calculation/measurement)]		
Прямой расчет [Direct calculation]	1,09	1,79
Неоднородное облако [Heterogeneous cloud]	4,72	9,47

Окончание таблицы

Регион [Region]	Мазовия [Mazovia]	Богемия [Bohemia]
Однородное облако [Homogeneous cloud]	1,17	1,61
Стандартное отклонение [Standard deviation]	1,67	1,76
Скорость экспоненциального уменьшения удельной активности ^{131}I в траве*, сутки$^{-1}$ [Rate of exponential reduction of grass activity*, day^{-1}]		
Измеренные данные [Measured data]	0,22	0,39
Расчетные данные [Calculated data]	0,18	0,16

* – в интервалах времени в период слабых осадков: 6–13 суток в Мазовии и 6–28 суток в Богемии.

Рис. 7. Гистограмма распределения отношения расчетных данных к инструментальным данным Богемии для прямого расчета
[**Fig. 7.** Histogram of the distributions of the ratio calculated to the instrumental data of Bohemia for direct calculation]

Отметим следующие особенности данных в таблице и на рисунках 6, 7:

– плотности выпадений ^{137}Cs в НП отбора травы по модели прямого расчета в среднем меньше фактических в 2,1 раза для Праги и в 1,9 раз для Варшавы;

– в период основных выпадений на метеостанциях, ближайших к НП отбора травы, были осадки: 2,1 мм в Praha – Karlov в Богемии и 0,8 мм в Warsawa Observ Asrt в Мазовии;

– реконструированные эффективные осадки в НП с отборами проб травы в 3 раза больше выпавших осадков на ближайших к ним метеостанциях в Богемии и в 3,8 раза в Варшаве;

– максимальные значения измерений травы в Мазовии были больше, чем в Богемии;

– больше чем в 2 раза отклонения расчетных данных от инструментальных начинают появляться только после 32 суток после аварии для Богемии, для Мазовии – в интервале 10–15 суток и после 20 суток после аварии; в целом, согласие данных для Богемии существенно лучше, чем для Мазовии;

– в каждом регионе прямые расчеты и расчеты по модели однородного облака практически совпадают и приводят к лучшему согласию с измерениями, чем модель неоднородного облака;

– значения стандартных среднегеометрических отклонений распределения отношения расчетных данных к инструментальным лежат в диапазоне 1,6–1,7;

– расчетные и инструментальные данные показывают значимое уменьшение удельной активности ^{131}I в траве после окончания основных выпадений за счет ее смыва с поверхности травы сильными продолжительными осадками с 13-х по 19-е сутки после аварии в Мазовии и с 30-х по 35-е сутки в Богемии (рис. 8);

– при достаточно большом числе измерений, как в «Пражском» сценарии, распределение отношения реконструированных данных к инструментальным данным удельной активности ^{131}I в траве по числу измерений может быть аппроксимировано логнормальным законом (см. рис. 7); это свидетельствует о случайном характере временной вариабельности инструментальных данных относительно зависимости их средних значений от времени.

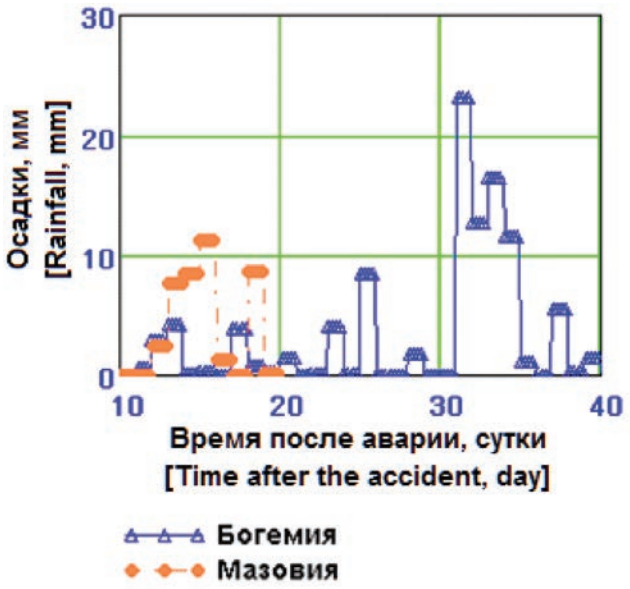


Рис. 8. Осадки в Богемии и Мазовии
[**Fig. 8.** Rain in Bohemia and Mazovia]

Наибольший интерес представляют данные о динамике инструментальных и расчетных данных. В периоды слабых осадков в Богемии до 31-х суток и в Мазовии до 13-х суток скорости уменьшения расчетных данных практически совпадают. В Богемии такая же степень согласия имеется между расчетными и инструментальными данными. В отличие от этого, в Мазовии динамика инструментальных и расчетных данных имеет существенные различия:

– скорость уменьшения инструментальных данных в интервале времени до 13 суток после аварии более чем в 2 раза больше скорости уменьшения расчетных данных, а в интервале времени от 13 до 19 суток с сильными осадками равна 0,09 сут$^{-1}$ и совпадает со скоростью распада ^{131}I;

– расчетная скорость уменьшения активности ^{131}I в Варшаве в период времени от 13-х до 19-х суток после аварии увеличивалась от средней 0,18 сут$^{-1}$ до 0,31 сут$^{-1}$ за счет интенсивных осадков 9–11 мм/сут.

Отмеченные особенности в динамике инструментальных и расчетных данных в Мазовии могут быть обусловлены спецификой травяного покрова в месте отбора проб травы на территории метеостанции в Мазовии.

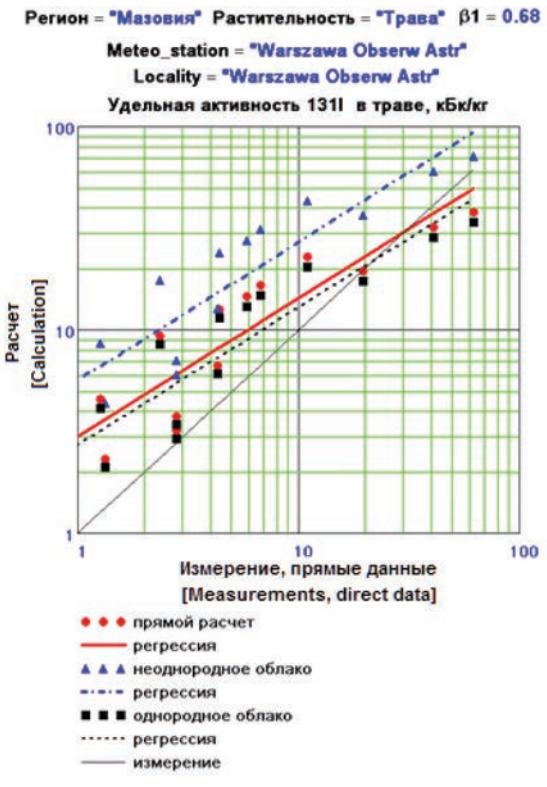
Выявить это можно из анализа диаграмм рассеивания «расчет – измерение» на рисунке 9.

Данные диаграмм для Мазовии показывают, что значения расчетных данных и их регрессии наилучшим образом совпадают с данными измерений только в области их максимальных значений. В области меньших значений результаты расчета начинают становиться существенно больше инструментальных данных. Для модели прямого расчета и модели однородного облака это превышение увеличивается с уменьшением инструментальных данных, достигая величин 2–4 раз. Такой вид расчетных зависимостей является отражением их более медленного уменьшения со временем, чем у инструментальных данных (см. рис. 3а).

Аналогичные диаграммы рассеивания для Богемии имеют существенно меньшее расхождение расчетных и инструментальных данных, особенно для модели однородного облака. Для этой модели имеется вполне удовлетворительное согласие не только по углу наклона, но также и по их абсолютным значениям средних значений отношения расчет/измерение.

Угловой коэффициент β в логарифмических зависимостях $Y = \alpha * e^{\beta * X}$, где X – измерение, Y – расчет, для модели однородного облака в Богемии равен 1,11 и меньше, чем в прямом расчете, равном 1,24. В идеальном случае величина β равна 1. Для Мазовии коэффициент β значимо больше отличается от 1 и равен для обеих моделей 0,68.

Возможной причиной такого различия инструментальных и расчетных данных в Мазовии могло стать то, что все выполненные расчеты для обоих регионов проводились для дикорастущей многолетней травы. Между тем измерения в Мазовии проводились на территории метеостанции для газонной травы, которая обычно периодически скашивается. Поэтому был проведен дополнительный расчет для культурной однолетней и многолетней газонной травы с учетом ее укосов при достижении плотности сырой биомассы травы ~1 кг/м^2. После каждого укоса на газоне остается трава с плотностью биомассы 0,3 кг/м^2 с последующим нарастанием биомассы незагрязненной травы.



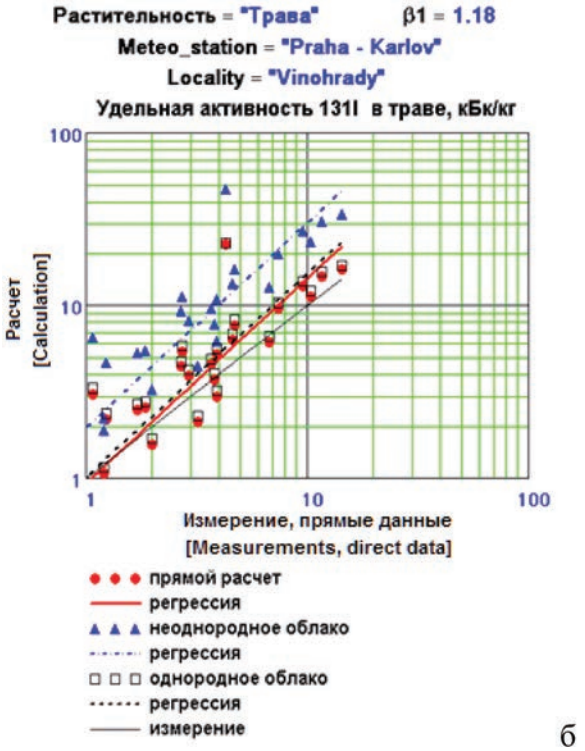


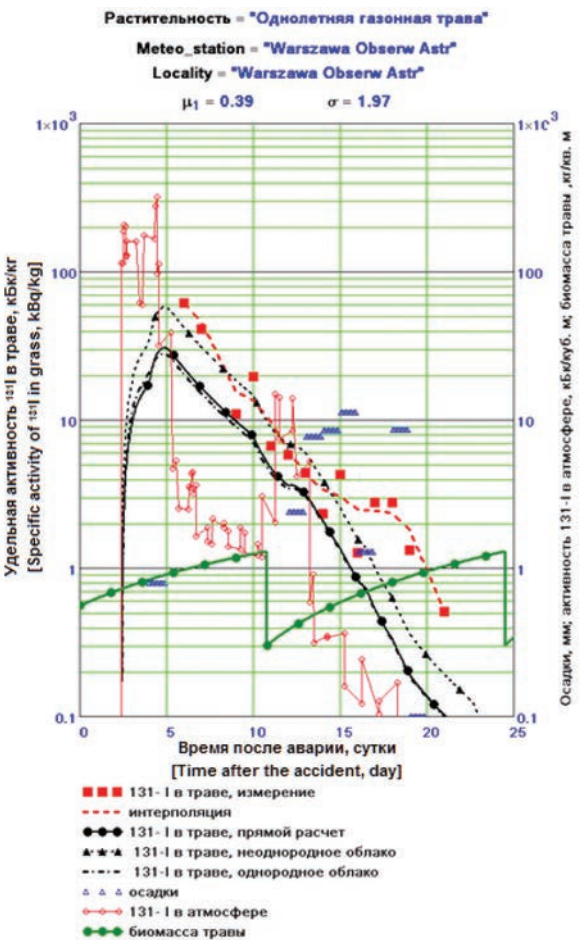
Рис. 9. Диаграммы рассеивания «расчетные – инструментальные данные» удельных активностей ^{131}I в траве: а) Мазовия и б) Богемия [**Fig. 9.** Scatterplots of estimated and instrumental data of specific activities of ^{131}I in the a) Mazovia grass b) in the Bohemia grass]

Инструментальные данные удельной активности ^{131}I в траве, расчетные данные для сеяной однолетней и многолетней травы вместе с данными об осадках, удельной активности ^{131}I в атмосфере и плотностей сырой биомассы этих типов трав с учетом их периодического скашивания приведены на рисунке 10.

Расчеты по моделям прямого расчета и однородного облака для многолетней газонной травы практически совпадают и показывают вполне удовлетворительное согласие с инструментальными данными как со всеми особенностями их динамики во всем временном интервале измерений, так и по величинам средних значений отношений расчетных данных к инструментальным. Среднегеометрическое значение и стандартное среднегеометрическое отклонение отношений расчет/измерение для многолетней газонной травы равны 1,1 и 1,8 соответственно. Модель неоднородного облака дает в 1,8 раза больше расчетные значения, чем модель прямого расчета за счет коэффициента пересчета удельных активностей ^{131}I в атмосфере (см. табл., Kq_{cloud}), что и приводит к завышенным в 1,6 раза результатам расчетов по сравнению с инструментальными данными.

Напомним, что расчет, выполненный для дикорастущей травы по моделям прямого расчета и однородного облака, давал существенно большее расхождение со средним значением отношения расчет/измерения 1,84 (см. рис. 6 и 7). Приведенные на рисунке 10 данные для однолетней и многолетней газонной травы показывают, что в период времени больше 10 суток после аварии удельная активность многолетней травы становится больше, чем у однолетней за счет меньшей скорости прироста ее чистой биомассы.

Наиболее значимое улучшение согласия инструментальных и расчетных данных для газонной травы произошло в диаграммах их рассеивания (рис. 11), по сравнению с аналогичными данными для дикорастущей травы (см. рис. 9а).



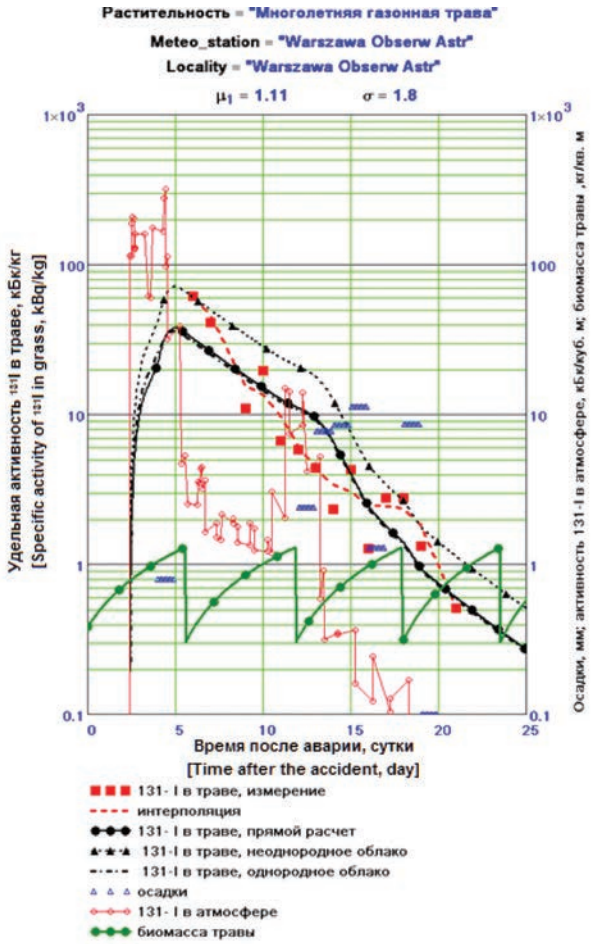


Рис. 10. Динамика удельной активности ^{131}I в газонной траве, осадков, плотности биомассы травы и удельных объемных активностей ^{131}I в атмосфере Мазовии

[**Fig. 10.** Dynamics of activity of specific activity of ^{131}I in lawn grass, precipitation, grass biomass density and specific volume activities of ^{131}I in the atmosphere of Mazovia]

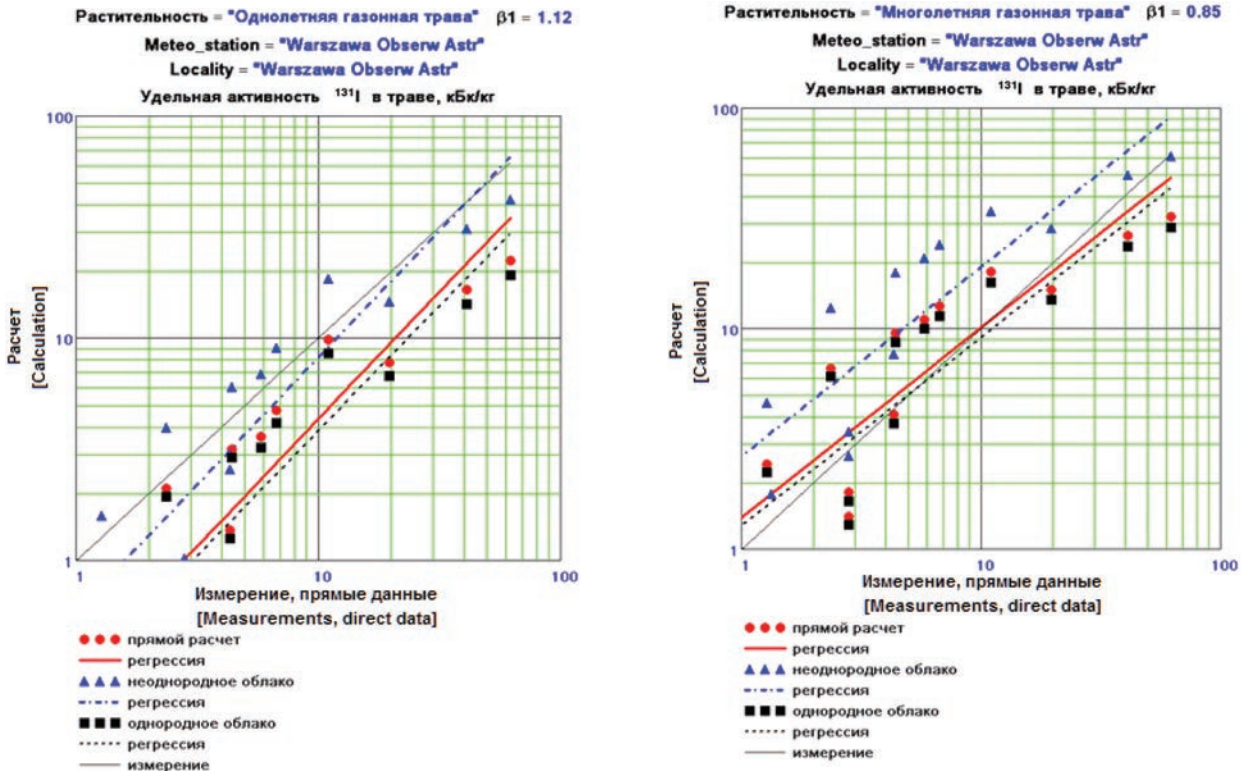


Рис. 11. Диаграммы рассеивания расчетных и инструментальных данных для газонной однолетней и многолетней травы [**Fig. 11.** The scatter plots of calculated and measured data for annual and perennial lawn grass]

Регрессионные зависимости «расчетные – инструментальные данные», в отличие от данных на рисунке 9а, практически параллельны диагонали с коэффициентом β, равным 1,12 для однолетней и 0,85 для многолетней травы.

Вполне удовлетворительное согласие расчетных и инструментальных данных по всей совокупности полученных результатов является прямым подтверждением как корректности взаимосогласованной базы радиоэкологических данных, созданной в работе [9], так и возможностей корректного воспроизведения имитационной моделью основных процессов, определяющих динамику плотностей выпадения радионуклидов на местность и загрязнения растительности. Основные результаты анализа расчетных и инструментальных данных динамики удельных активностей ^{131}I в траве Мазовии и Богемии можно сформулировать следующим образом:

– скорости экспоненциального уменьшения инструментальных данных удельной активности ^{131}I в траве Мазовии и Богемии существенно различаются и равны 0,34 сут$^{-1}$и 0,11 сут$^{-1}$ соответственно;

– фактические плотности выпадения ^{137}Cs в местах отбора проб травы в среднем больше плотностей выпадения, реконструированных по модели прямого расчета: в 2,9 раза – для Праги и в 2 раза – для Варшавы;

– эффективные осадки за время основных выпадений в местах отбора проб травы, реконструированные по модели однородного облака, в 3–4 раза больше, чем на ближайших к ним метеостанциях;

– расчетные данные удельной активности ^{131}I в траве по модели прямого расчета и по модели однородного облака практически совпадают и приводят к лучшему согласию с инструментальными данными, чем по модели неоднородного облака;

– среднегеометрические значения отношений расчет/измерение для однолетней и многолетней газонной травы равны 0,38 и 1,11 соответственно со стандартными среднегеометрическими отклонениями, равными 1,97 и 1,8;

– регрессионные зависимости диаграмм рассеивания «расчетные – инструментальные данные» практически параллельны диагонали с коэффициентом β, равным 0,94 для однолетней и 0,86 для многолетней травы;

– расчетные и инструментальные данные показывают значимое уменьшение удельной активности ^{131}I в траве после окончания основных выпадений за счет их смыва с поверхности травы сильными продолжительными осадками через 13 и 19 суток после аварии в Мазовии и через 30 и 35 суток в Богемии.

Выводы

1. Проведена верификация радиоэкологической модели на инструментальных данных динамики активностей ^{131}I в травяной растительности Богемии и Мазовии с выявлением правдоподобных и реалистических сценариев, приводящих к оптимальному согласию расчетных и инструментальных данных.

2. Оценены неопределенности радиоэкологической модели на этапе реконструкции динамики активностей ^{131}I в травяной растительности для последующего их использования в исследованиях загрязнения зеленого корма и молока молочных коров.

3. Совокупность полученных результатов указывает на корректность имитационной модели при учете ос-

новных процессов, определяющих динамику выпадения радионуклидов на местность и загрязнения растительности в период выпадения и после окончания основных выпадений.

Литература

1. Testing of Environmental Transfer Models Using Data from the Atmospheric Release of Iodine-131 from the Hanford Site, USA, in 1963. – IAEA: Vienna, 2003.
2. Kruk, J.E., Pröhl, G., Kenigsberg, J.I. A radioecological model for thyroid dose reconstruction of the Belarus population following the Chernobyl accident. Radiat. Environ. Biophys., 2004, V. 43, N 2, pp. 101–110.
3. Gering, F., Weiss, W., Wirth, E., Stapel, R., Jacob, P., Muller, H., Pröhl, G. Assessment and evaluation of the radiological situation in the late phase of a nuclear accident. Radiat. Prot. Dosim., 2004, V. 109, N 1–2, pp. 25–29.
4. The RODOS system. Version PV6.0. Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Kern- und Energietechn. Germany, 2005.
5. Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS): a summary report of the results of the EMRAS programme (2003–2007). IAEA-TECDOC-1678. Vienna: IAEA, 2012, 60 p.
6. Krajewski, P., Ammann, M., Bartusková, M., Duffa, C., Filistovic, V., Homma, T., Kanyár, B., Malátová, I., Nedveckaite, T., Simon, S., Vlasov, O., Webbe-Wood, D., Zvonova, I. Validation of environmental transfer models and assessment of the effectiveness of countermeasures using data on 131I releases from Chernobyl. Appl. Radiat. Isot., 2008, V. 66, N 11, pp. 1730–1735.
7. Bartusková, M., Malátová, I., Berkovskyy, V., Krajewski, P., Ammann, M., Filistovic, V., Homma, T., Horyna, J., Kanyár, B., Nedveckaite, T., Vlasov, O., Zvonova, I. Radioecological assessments of the Iodine working group of IAEA's EMRAS programme: Presentation of input data and analysis of results of the Prague scenario. Radioprotection, 2009, V. 44, N 5, pp. 295–299.
8. Zvonova, I., Krajewski, P., Berkovsky, V., Ammann, M., Duffa, C., Filistovic, V., Homma, T., Kanyar, B., Nedveckaite, T., Simon, S.L., Vlasov, O., Webbe-Wood, D. Validation of 131I ecological transfer models and thyroid dose assessments using Chernobyl fallout data from the Plavsk district, Russia. J. Environ. Radioact., 2010, V. 101, N 1, pp. 8–15.
9. Власов, О.К. Создание и верификация взаимосогласованной базы входной информации имитационной модели транспорта радионуклидов 137Cs и 131I по пищевой цепочке на инструментальных радиоэкологических данных (по материалам «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS) / О.К. Власов, П. Краевский, М. Бартускова, И. Малатова, Н.В. Щукина, С.Ю. Чекин, К.А. Туманов, И.А. Звонова // Радиация и риск. – 2019. – Т. 28, № 3. – С. 5–23.
10. Власов, О.К. Радиоэкологическая модель транспорта радионуклидов йода и цезия по пищевым цепочкам после радиационных аварий с выбросом в атмосферу для исследований закономерностей формирования доз внутреннего облучения населения. Часть 1. описание, постановка и свойства агроклиматического блока / О.К. Власов // Радиация и риск. – 2013. – Т. 22, № 2. – С. 16–34.

Поступила: 04.09.2019 г.

Власов Олег Константинович – заведующий лабораторией радиационно-экологической информатики, доктор технических наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава России, Обнинск, Россия

Краевский Павел – профессор, директор Центральной лаборатории радиационной защиты, Варшава, Польша

Звонова Ирина Александровна – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: iz_zv@bk.ru

Малатова Ирена – старший научный сотрудник, кандидат физических наук, Национальный институт радиационной защиты, Прага, Чехия

Бартускова Милусе – заведующая лабораторией, доктор философии, филиал Национального института радиационной защиты, Острава, Чехия

Щукина Наталия Владиленовна – старший научный сотрудник лаборатории радиационно-экологической информатики, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава России, Обнинск, Россия

Чекин Сергей Юрьевич – заведующий лабораторией оптимизации радиологической защиты, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава России, Обнинск, Россия

Туманов Константин Александрович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией научно-методического сопровождения радиологических регистров и банков данных, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава России, Обнинск, Россия

Для цитирования: Власов О.К., Краевский П., Звонова И.А., Малатова И., Бартускова М., Щукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А. Верификация радиоэкологической модели на инструментальных данных удельной активности ^{131}I в траве в Мазовии и Богемии после аварии на ЧАЭС (по материалам «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS) // Радиационная гигиена. – 2019. – Т.12, № 4. – С. 6-17. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-6-17

Verification of radioecological models to the instrumental data of the specific activity ^{131}I in a grass in Mazovia and Bohemia after the Chernobyl accident (from "Prague" and "Warsaw" scenarios of the IAEA project EMRAS

Oleg K. Vlasov[1], Pavel Krajewski[2], Irina A. Zvonova[3], Irena Malatova[4], Miluse Bartuskova[5], Nataliya V. Schukina[1], Sergey Yu. Chekin[1], Konstantin A. Tumanov[1]

[1] A. Tsyb Medical Radiation Research Center, Obninsk, Russia

[2] Central Laboratory for Radiological Protection), Warsaw, Poland

[3] Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

[4] National Radiation Protection Institute, Prague, Czech Republic

[5] Branch of National Radiation Protection Institute, Ostrava, Czech Republic

The analysis of instrumental data of "Prague" and "Warsaw" scenarios on the dynamics of ^{131}I specific activities in the grass is carried out. Reconstruction of the ^{131}I the specific activities dynamics in the grass in the Mazovia and Bohemia localities is performed in three models: direct calculation the input data of the "Prague" and "Warsaw" scenarios, homogeneous cloud, heterogeneous rain and heterogeneous cloud-homogeneousrain. The actual ^{137}Cs fallout densities in the grass sampling sites in average more than 2.9 times for Prague and 2 times for Warsaw. Effective rain during the main fallout at the grass sampling sites, reconstructed on the model of a homogeneous cloud is 3–4 times more than at the nearest weather stations during this time. A realistic scenario of the input data leading to the optimal agreement of the calculated and instrumental data is revealed. It is shown that direct calculations and the homogeneous cloud model give almost identical results and lead to a significantly better agreement with the instrumental data than the an inhomogeneous cloud model. The calculated and instrumental data show a significant decrease in the ^{131}I specific activity in the grass after the end of the main fallout due to its flushing from the grass surface by strong prolonged rain 13 and 19 days after the accident in Mazovia and 30 and 35 days in Bohemia. Uncertainties in the results of reconstruction of the dynamics of ^{131}I and ^{137}Cs activities in vegetation are estimated. The mean-geometric values and standard mean-geometric deviations of the calculation/ 8instrumental data ratios are: 0.8–1.1 and 1.8–1.9 for grass.

Key words: *Chernobyl accident, radioecological model, IAEA project EMRAS, "Prague" and the Warsaw" scenarios, model verification, specific activity of ^{131}I in the grass, weather conditions, densities of ^{137}Cs deposition, estimates of the uncertainty of the model.*

References

1. Testing of Environmental Transfer Models Using Data from the Atmospheric Release of Iodine-131 from the Hanford Site, USA, in 1963. IAEA, Vienna, 2003.
2. Kruk, J.E., Pröhl, G., Kenigsberg, J.I. A radioecological model for thyroid dose reconstruction of the Belarus population following the Chernobyl accident. Radiat. Environ. Biophys., 2004, vol. 43, no. 2, pp. 101–110.
3. Gering, F., Weiss, W., Wirth, E., Stapel, R., Jacob, P., Muller, H., Pröhl, G. Assessment and evaluation of the radiological situation in the late phase of a nuclear accident. Radiat. Prot. Dosim., 2004, vol. 109, no. 1–2, pp. 25–29.
4. The RODOS system. Version PV6.0. Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Kern- und Energietechn. Germany, 2005.
5. Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS): a summary report of the results of the EMRAS programme (2003–2007). IAEA-TECDOC-1678. Vienna, IAEA, 2012, 60 p.
6. Krajewski, P., Ammann, M., Bartusková, M., Duffa, C., Filistovic, V., Homma, T., Kanyár, B., Malátová, I., Nedveckaite, T., Simon, S., Vlasov, O., Webbe-Wood, D., Zvonova, I. Validation of environmental transfer models and assessment of the effectiveness of countermeasures using data on ^{131}I releases from Chernobyl. Appl. Radiat. Isot., 2008, vol. 66, no. 11, pp. 1730–1735.
7. Bartusková, M., Malátová, I., Berkovskyy, V., Krajewski, P., Ammann, M., Filistovic, V., Homma, T., Horyna, J., Kany r, B., Nedveckaite, T., Vlasov, O., Zvonova, I. Radioecological assessments of the Iodine working group of IAEA's EMRAS programme: Presentation of input data and analysis of results of the Prague scenario. Radioprotection, 2009, vol. 44, no. 5, pp. 295–299.
8. Zvonova, I., Krajewski, P., Berkovsky, V., Ammann, M., Duffa, C., Filistovic, V., Homma, T., Kanyar, B., Nedveckaite, T., Simon, S.L., Vlasov, O., Webbe-Wood, D. Validation of ^{131}I ecological transfer models and thyroid dose assessments using Chernobyl fallout data from the Plavsk district, Russia. J. Environ. Radioact., 2010, vol. 101, no. 1, pp. 8–15.
9. Vlasov O.K., Krajewski P., Bartuskova M., Malatova I., Shchukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A., Zvonova I.A. The creation and verification of a mutually agreed database of input information of the simulation model of transport of

Irina A. Zvonova
Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev.
Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: iz_zv@bk.ru

radionuclides ^{137}Cs and ^{131}I along the food chain on instrumental radioecological data (based on the materials of the "Prague" and "Warsaw" scenarios of the IAEA EMRAS project). Radiatsiya i risk = Radiation and Risk, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 5–23. (In Russian)

10. Vlasov O.K. Radioecological model for transport of radioiodine and radiocesium in the food chains after radiological accidents and discharge of radioactive substances to atmosphere for study of mechanism of formation of internal radiation doses to population. Part 1. Description, formulation and properties of agroclimatic model. Radiatsiya i risk = Radiation and Risk, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 16–34. (In Russian)

Received: September 04, 2019

Oleg K. Vlasov – Head of the Laboratory of Radiation-environmental Informatics, Dr.Sci.Tech., A. Tsyb Medical Radiation Research Center, Obninsk, Russia

Krajewski Pavel – Professor, Director of the Central Laboratory of Radiological Protection, Warsaw, Poland

For correspondence: Irina A. Zvonova – Dr.Sci.Tech., Chief Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: iz_zv@bk.ru)

Malatova Irena – Senior Researcher of National Radiation Protection Institute, Prague, Czech Republic

Bartuskova Miluse – Ph.D, Head of radiochemistry department National Radiation Protection Institute, Ostrava, Czech Republic

Nataliya V. Shchukina – Senior Researcher of the Laboratory of Radiation-Environmental Informatics, A. Tsyb Medical Radiation Research Center, Obninsk, Russia

Sergey Yu. Chekin – Head of the Laboratory of Optimization of Radiological Protection, A. Tsyb Medical Radiation Research Center, Obninsk, Russia

Konstantin A. Tumanov – Head of the Laboratory of Scientific-methodical Maintenance of Radiological Registers and Data Banks), C. Sc., Biol., A. Tsyb Medical Radiation Research Center, Obninsk, Russia

For citation: Vlasov O.K., Krajewski P., Zvonova I.A., Malatova I., Bartuskova M., Schukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A. Verification of radioecological models to the instrumental data of the specific activity ^{131}I in a grass in Mazovia and Bohemia after the Chernobyl accident (from "Prague" and "Warsaw" scenarios of the IAEA project EMRAS Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 6-17. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-6-17