

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АКТИВНОСТИ ^{131}I В ПАСТБИЩНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ МАЗОВИИ В ГОД АВАРИИ НА ЧАЭС: РЕКОНСТРУКЦИЯ, ВЕРИФИКАЦИЯ, ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ

О.К. Власов*, И.А. Звонова**, Н.В. Щукина*, С.Ю. Чекин*

* МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России
249035, Калужская обл., Обнинск, Королева, 4

** ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева
197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, 8



С использованием радиоэкологической модели, представляющей собой систему линейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику транспорта радионуклидов ^{137}Cs и ^{131}I по пищевой цепочке после их выброса в атмосферу в результате аварии на ЧАЭС, выполнена реконструкция «инструментальных» данных активностей ^{131}I в траве пастбищ центральной части Мазовии. Реконструкция выполнена по четырем моделям атмосферы: прямой расчёт, однородное облако – неоднородные осадки, неоднородное облако – однородные осадки и модель с пересчётом активностей радионуклидов в атмосфере. «Инструментальные» данные восстанавливались по прямым измерениям активностей ^{131}I в газонной траве. Показано, что модели прямого расчёта и однородного облака приводят к лучшему согласию расчётных и реконструированных «инструментальных» данных, чем модель неоднородного облака. Среднеарифметическое значение отношений расчётных данных к реконструированным «инструментальным» данным для моделей прямого расчёта и однородного облака лежит в диапазоне 0.84 – 0.95; для модели неоднородного облака – в диапазоне 1.7 – 3.0. Среднегеометрическое отклонение постоянно и равно 1.7. «Инструментальные» и реконструированные «инструментальные» данные показывают значимое уменьшение удельной активности ^{131}I в траве за счёт ее смыва непрерывными осадками как в период осадков, так и после основных выпадений. За счёт этого эффекта коэффициент задержки на траве в виде отношения максимальной активности ^{131}I к плотности выпадения ^{137}Cs убывает с 34 до 1.4 м²/кг при увеличении активности с 1 до 29 кБк/м² за счёт роста осадков с 0 до 40 мм.

Ключевые слова: авария на ЧАЭС, проект МАГАТЭ EMRAS, «Варшавский» сценарий, имитационная агрорадиоэкологическая модель, модели радиоактивного облака, формы ^{131}I в атмосфере, плотности выпадения ^{137}Cs , верификация радиоэкологической модели.

Власов О.К., Звонова И.А., Щукина Н.В., Чекин С.Ю. Радиоэкологическое моделирование динамики активности ^{131}I в пастбищной растительности Мазовии в год аварии на ЧАЭС: реконструкция, верификация, оценки достоверности. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 2. – С. 107–120. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.09>.

© О.К. Власов, И.А. Звонова, Н.В. Щукина, С.Ю. Чекин, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является пятой в серии работ [1 – 4], посвященной исследованию динамики транспорта радионуклидов ^{137}Cs и ^{131}I по трофической цепочке *атмосфера – почва – растительность – организм молочных коров – молоко – организм человека* после аварии на ЧАЭС с использованием имитационной радиоэкологической модели после радиационной аварии с выбросом продуктов в атмосферу [5].

Цель исследования – реализация метода пересчета инструментальных данных динамики активности радионуклидов в травяной растительности одного вида для растительности других видов, в частности, от газонной травы к траве пастбищ; создание базы данных динамики реконструированных «инструментальных» и расчетных данных удельных активностей ^{131}I в траве культурных пастбищ молочных округов (далее – округов) Мазовии на примере данных «Варшавского» сценария; оценки статистических параметров отношений расчетных данных к реконструированному «инструментальным» данным зеленого корма молочных коров в этих округах. При создании базы взаимосогласованных данных (атмосфера – осадки за период выпадений – плотность выпадений ^{137}Cs на местность – активность ^{131}I в траве пастбищ) учтены выводы исследований, выполненных в [1 – 4] о том, что инструментальные данные о динамике активности ^{131}I в газонной траве относятся к ее многолетнему виду.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования динамики удельных активностей ^{131}I в траве культурных пастбищ молочных округов Мазовии проводятся на базе имитационной радиоэкологической модели после радиационных аварий с выбросом продуктов в атмосферу [5]. Имитационная агрорадиоэкологическая модель переноса выброшенных в атмосферу радиоактивных продуктов аварии на ЧАЭС в окружающей среде представляет собой систему линейных дифференциальных уравнений с неоднородными коэффициентами, зависящими от времени. Эффективные скорости «сухих» выпадений и выпадений ^{137}Cs , ^{131}I с осадками («мокрых»), формы существования йода в атмосфере используются для описания осаждения радионуклидов на землю и поверхность растительности. Коэффициенты задержки активностей радионуклидов на растительности зависят от ее биомассы и экспоненциально уменьшаются с увеличением толщины слоя дождевой воды на листовой поверхности растительности.

В качестве входных данных расчётной модели используются данные «Варшавского» сценария «йодной группы» проекта МАГАТЭ EMRAS [5 – 9].

В сценарии приведен следующий набор входных данных за 1986 г.:

- удельные активности ^{137}Cs , ^{131}I (рис. 1) и фаз существования ^{131}I в атмосфере в период с 12.5 часов 26 апреля по 20.5 часов 02 июня в г. Варшаве (рис. 2);
- плотности выпадений ^{137}Cs в 33-х населенных пунктах – местах дислокаций молочных ферм и статистические данные о структуре плотностей его выпадения на территориях 28-ми округов, реконструированных методами ГИС-технологий в виде его минимальных, максимальных и средних величин выпадений ^{137}Cs ;
- осадки в период с 26 апреля по 16 мая (см. рис. 1) и годовой ход среднесуточных температур воздуха на 33 метеостанциях (рис. 3);
- урожайность растительности разных видов и удойность молочных коров;
- результаты измерений удельной активности ^{131}I в газонной траве на территории метеостанции Warszawa Obserw Astr в г. Варшава за период с 03 по 18 мая 1986 г. (рис. 4) (Gr1, Gr2): Gr1 – измерение, Gr2 – экспоненциальная интерполяция;
- результаты измерений удельной активности ^{131}I в молоке на пяти молочных фермах (далее – фермах) и в 12-ти молочных округах (далее – округах) с 28 апреля по 07 июня 1986 г. с максимальным числом измерений от 20-ти до 30-ти на четырёх фермах и с числом измерений, меньшим пяти во всех округах.

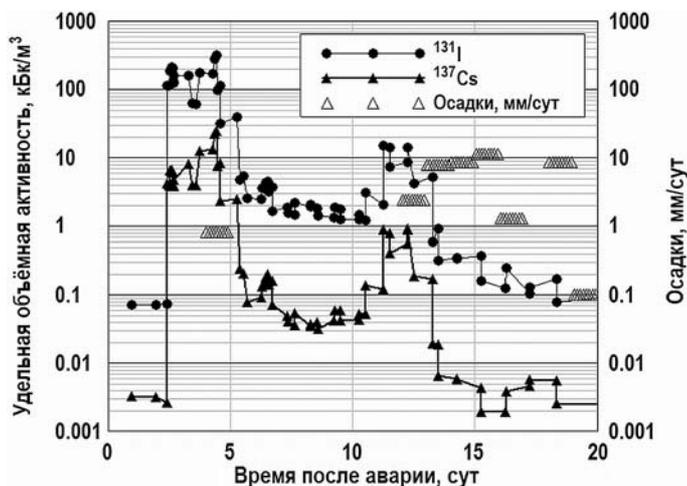


Рис. 1. Динамика удельных объемных активностей ^{137}Cs , ^{131}I в атмосфере и осадков ($\sigma_{\text{CsDep}} = 3.26 \text{ kBq/m}^2$ – плотность выпадения ^{137}Cs , kBq/m^2 , метеостанция Warszawa Observ Astr)

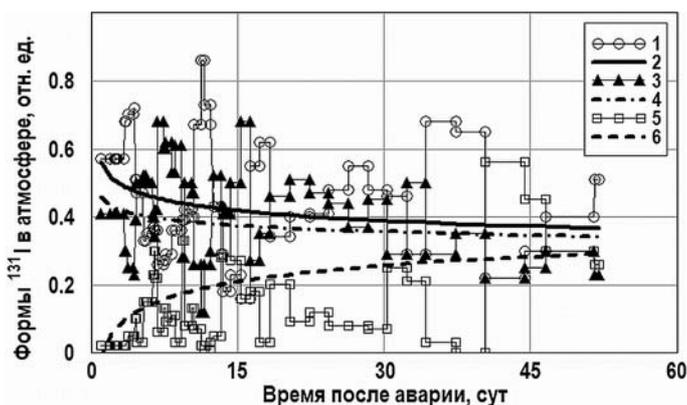


Рис. 2. Динамика форм ^{131}I в атмосфере центральной части Мазовии – средние за период основных выпадений 2.5 – 5 сут после аварии значения относительных долей аэрозольного, органического и газообразного йода: 1 – аэрозольная форма $\delta_{\text{аэр}} = 0.4$; 2 – интерполяция (1); 3 – органическая форма $\delta_{\text{орг}} = 0.05$; 4 – интерполяция (3); 5 – газообразная форма $\delta_{\text{газ}} = 0.55$; 6 – интерполяция (5)

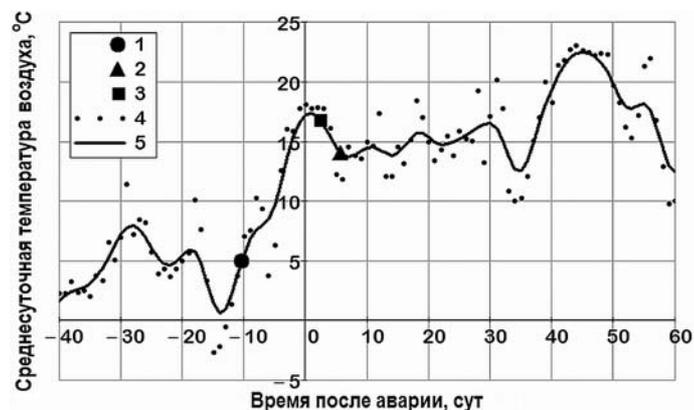


Рис. 3. Временные экологические параметры (1 – 3) и среднесуточная температура воздуха (4, 5): 1 – начало весенней вегетации; 2 – начало пастбищного периода молочного скота ($t_{\text{pastc}} = 6$ сут); 3 – начало радиоактивных выпадений ($\theta_{\text{дер0}} = 2.4$ сут); 4 – метеоданные; 5 – сглаженные данные (Мазовия, растительность – трава культурных пастбищ)

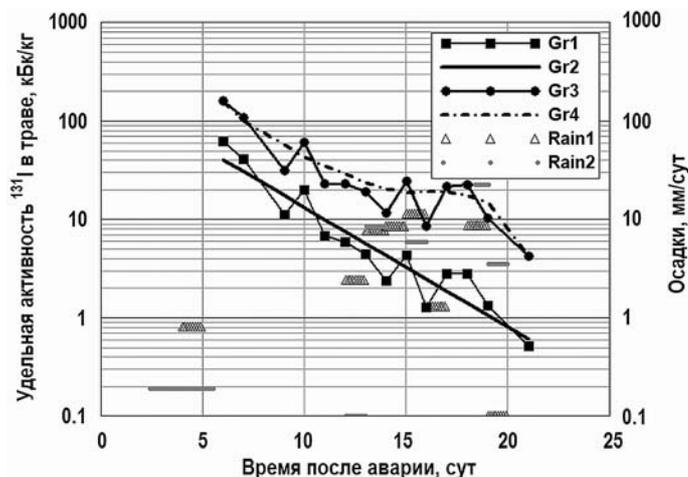


Рис. 4. Инструментальные данные активности ^{131}I в газонной траве (Gr1, Gr2) с метеоданными об осадках на метеостанции Warsaw Observ Astr район Warsaw Area (Rain1) и реконструированные «инструментальные» данные для травы пастбищ округа Ostrolecki (Gr3, Gr4) с осадками на метеостанции Myzsywiec район Osrtoleka Area (Rain2): Gr1 – инструментальные данные; Gr2 – экспоненциальная интерполяция Gr1; Gr3 – реконструированные «инструментальные» данные; Gr4 – нелинейная интерполяция Gr3

Реконструкция динамики активности ^{131}I в траве выполнялась по следующим четырем моделям атмосферы:

- **модель прямого расчёта** – по данным активности ^{137}Cs в атмосфере над районом и метеоданным об осадках за период основных выпадений на ближайших к НП и на территории округов метеостанций рассчитываются плотность выпадения ^{137}Cs в НП и динамика удельных активностей ^{131}I в пастбищной растительности; отношение расчётной к инструментальной плотности выпадений ^{137}Cs используется как нормирующий множитель для корректировки активностей ^{137}Cs , ^{131}I в атмосфере над данным НП в модели неоднородного облака; эффективные осадки постоянной интенсивности в период основных выпадений реконструируются по инструментальным данным плотности выпадений ^{137}Cs на данном НП и расчётной зависимости плотностей выпадения ^{137}Cs от эффективных осадков; эффективные осадки используются в модели неоднородного облака;

- **модель однородного облака - неоднородных осадков** – одинаковая удельная объемная активность радионуклидов в атмосфере над регионом – эффективные осадки с постоянной интенсивностью в период основных выпадений в населенных пунктах, рассчитываемые по модели прямого расчета;

- **модель неоднородного облака - однородных осадков** – регион неоднородного облака включает в себя все населенные пункты вокруг ближайшей к ним метеостанции для каждого НП региона – данные этой метеостанции об осадках за период основных выпадений; нормирующий множитель для корректировки активностей ^{137}Cs , ^{131}I в атмосфере над каждым НП рассчитывается в модели прямого расчёта.

- **модель с пересчётом активностей радионуклидов в атмосфере над районом Ostroleka Area** – пересчет производится пропорционально на величину отношения минимальной плотности выпадения ^{137}Cs в районе к плотности его «сухих выпадений».

В Мазовии существует следующая система производства молока и молочной продукции: фермы объединены в округа; в каждом округе находится пункт сбора молока с ферм, где располагаются цистерны по его приему; далее цистерны доставляют молоко на предприятия молочной промышленности, объединенные в молочные районы (далее – районы). Все данные сценария приведены для двух районов – Warsaw Milk Area и Ostroleka Milk Area. Отбор проб молока в округах проводился из цистерн в местах их сбора, на

фермах из емкостей, куда поступало молоко от всех коров.

В динамике активностей ^{131}I и ^{137}Cs в атмосфере (см. рис. 1) видны два пика: 2.4 – 5.3 и 10.5 – 13.5 сут после аварии. Основные выпадения происходили в период первого пика с двойным максимумом активностей ^{131}I в атмосфере 200 Бк/м³ на 2.6 сут и 315 Бк/м³ на 4.4 сут.

В период основных выпадений осадки были только на двух метеостанциях: Warszawa Obserw Astr – 0.8 мм и Břinow – 7.3 мм. На всех остальных метеостанциях осадков в период первого пика не было. Максимальная активность ^{131}I в атмосфере в период второго пика была на порядок меньше и составила 15 Бк/м³. По метеоданным в обоих районах с 13-го по 18-е мая на всех метеостанциях были зарегистрированы интенсивные осадки с суточной интенсивностью 10 – 15 мм, захватившие начало второго пика (см. рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При реконструкции динамики активности ^{131}I в пастбищной растительности молочных ферм использовались данные о плотностях выпадения ^{137}Cs в населенных пунктах их расположения, в округах – средние величины выпадения ^{137}Cs на их территориях.

На первом этапе данные измерений удельной активности ^{131}I в газонной траве на метеостанции Warszawa Obserw Astr по методу, предложенному в работе [4], пересчитывались к «инструментальным» данным для травы культурных пастбищ ферм и округов, в которых производились отборы проб молока на радиометрию. Такой пересчет производился от базы «инструментальных» и расчетных данных для места радиометрии газонной травы к базе данных для травы пастбищ в месте расположения рассчитываемой фермы или округа. Базы состояли из следующего набора данных:

- «инструментальные» данные плотностей выпадения ^{137}Cs в населенных пунктах, средние плотности выпадения ^{137}Cs на территориях молочных округов и метеоданные об осадках на метеостанциях;
- «инструментальные» данные удельных активностей ^{131}I газонной травы на территории метеостанции Warszawa Obserw Astr (см. рис. 4: Gr1 – измерение, Gr2 – экспоненциальная интерполяция Gr1), расчетные данные динамики биомасс газонной травы в населенных пунктах и травы культурных пастбищ в молочных округах.

Реконструкция «инструментальных» данных удельных активностей ^{131}I в траве пастбищ для всех ферм и округов в обоих районах проводилась по модели прямого расчета, а для района Ostroleka Area еще и по модели с пересчетом активностей ^{137}Cs и ^{131}I в атмосфере.

Основанием для такого пересчета послужило сопоставление данных о взаимном расположении районов Warsaw Area, Ostroleka Area в центральной части Мазовии и Чернобыльской АЭС.

Мазовия находится на сравнительно небольшом расстоянии от ЧАЭС. Поэтому можно ожидать неоднородного распределения продуктов выброса ЧАЭС в атмосфере над сравнительно крупными участками ее территории, таких как пространственно разделенных районов Warsaw Area и Ostroleka Area. К этому можно добавить, что размеры этих районов в два с половиной – три раза меньше размеров самой Мазовии и в семь – девять раз меньше расстояний этих районов от ЧАЭС. Это дает основания для предположений, с одной стороны, возможных различий в величинах активностей радионуклидов в атмосфере над территорией каждого района, а с другой – об однородности их пространственного распределения. Это предположение было проверено в [1] на основании анализа и обобщения расчетных и «инструментальных» данных о структуре выпадений ^{137}Cs в населенных пунктах и округах. Было установлено, что реконструированные по модели прямого расчета для района Warsaw Area плотности «сухих» выпадений ^{137}Cs $\sigma_{\text{dry}} = 1.2 \text{ кБк/м}^2$, что практически совпадает с минимальной плотностью выпадений

ний ^{137}Cs в НП этого района – 1.3 кБк/м^2 . В то же время в районе Ostroleka Area минимальная плотность выпадений ^{137}Cs была существенно большей – 3.24 кБк/м^2 . Это в 2.7 раза больше плотности «сухих» выпадений, оцененной по модели прямого расчета. При этом размах отношений максимальной к минимальной плотности выпадения ^{137}Cs в районе Warsaw Area (с осадками в период основных выпадений) равен 7.7, а на территории Ostroleka Area с «сухими выпадениями» плотность выпадений ^{137}Cs практически однородна с минимальным размахом 2.1. Поэтому к трем основным моделям расчета была добавлена еще одна модель атмосферы с пересчетом активности ^{137}Cs в облаке путем увеличения в 2.7 раза активностей ^{137}Cs в атмосфере над районом Ostroleka Area с сохранением относительных долей форм существования йода и отношений активностей ^{131}I к ^{137}Cs . Дополнительную независимую проверку обоснованности этой модели атмосферы предполагается провести при сопоставлении расчетных и «инструментальных» данных активности ^{131}I в молоке в этом районе.

Результаты реконструкции активностей ^{131}I в траве пастбищ округа Ostrolecki района Ostroleka Area с моделью пересчета облака (см. рис. 4: Gr3 – реконструкция, Gr4 – нелинейная интерполяция Gr3) показывают их существенное отличие от данных прямых измерений активности ^{131}I в газонной траве (Gr1 – измерение, Gr2 – экспоненциальная интерполяция Gr1) как по величинам их абсолютных значений, так и по скоростям их изменений со временем.

Результаты расчётов динамики активности ^{131}I в траве пастбищ в округе Piskі для модели атмосферы с пересчетом облака в районе Ostroleka Area показаны на рис. 5, где учитываются скорости экспоненциального уменьшения активности ^{131}I в траве на временном отрезке 6 – 18 суток для реконструированных $\lambda_m = 0.19 \text{ сут}^{-1}$ и расчётных $\lambda_c = 0.21 \text{ сут}^{-1}$ данных.

Средняя плотность выпадения ^{137}Cs в этом округе (3.8 кБк/м^2) практически совпадает и с пересчитанной плотностью «сухих» выпадений в этом районе (3.24 кБк/м^2). Поэтому результаты расчетов по всем трем моделям для этого округа: прямой расчет (отношение расчетных к «инструментальным» данным $\mu_1 = 0.88$), однородное облако ($\mu_2 = 1.06$) и неоднородное облако ($\mu_3 = 0.92$) совпадают с точностью до 12% и близки к идеальному значению 1.

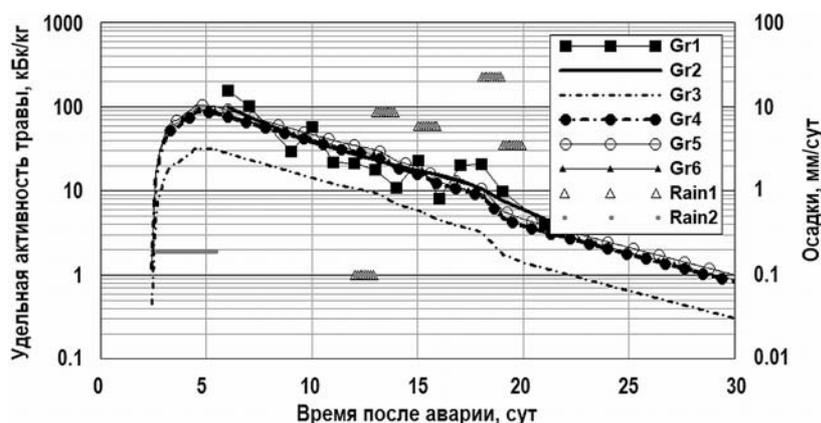


Рис. 5. Динамика «инструментальных» и расчётных данных удельной активности ^{131}I в траве культурных пастбищ и осадков в округе Piskі района Ostroleka Area (скорости экспоненциального уменьшения «инструментальных» $\lambda_m = 0.19 \text{ сут}^{-1}$ и расчётных $\lambda_c = 0.21 \text{ сут}^{-1}$ данных удельной активности ^{131}I в траве). Варианты данных активности ^{131}I в траве пастбищ: Gr1 – реконструированные «инструментальные» данные для облака с пересчётом; Gr2 – нелинейная интерполяция Gr1; Gr3 – реконструированные «инструментальные» данные для облака с инструментальными данными; Gr4 – модель прямого расчёта; Gr5 – модель неоднородного облака; Gr6 – модель однородного облака. Осадки: Rain1 – метеоданные; Rain2 – реконструкция в интервале 2,4 – 5,5 сут после аварии для облака с пересчётом

Здесь же приведены результаты аналогичного прямого расчета активности ^{131}I в тра-

ве для облака без пересчёта активностей ^{137}Cs и ^{131}I в атмосфере (см. рис. 5 – Gr3). Расчётные удельные активности ^{131}I в траве для этого варианта в 2.7 раза меньше «инструментальных» данных. Из рисунка 5 видно, что расчетная модель вполне удовлетворительно воспроизводит как максимальные значения, так и динамику спада активности ^{131}I в траве с размахом величин отношений расчетных к «инструментальным» данным, равным 0.9 – 1.15. Показатели скорости ее экспоненциального уменьшения для расчетных λ_c и «инструментальных» λ_m данных также практически совпадают.

Во всех расчётных и реконструированных «инструментальных» данных с существенными суточными осадками (10 – 20 мм) отмечается эффект увеличения скорости уменьшения удельной активности ^{131}I в траве пастбищ по сравнению с ее величиной на времена без осадков, меньшие (6 – 13) сут и большие 20 сут. Более детальный вариант рассмотрения этого эффекта приведен для фермы Břinow bis на рис. 6 и в табл. 1.

Здесь представлены реконструированные «инструментальные» Gr1 их нелинейная интерполяция Gr2 и расчетные данные для моделей неоднородного облака с учетом Gr3 и без учета осадков после окончания основных выпадений Gr4. Скорости уменьшения расчетных и реконструированных «инструментальных» данных ^{131}I в траве пастбищ при расчётах с учетом и без учета осадков после окончания основных выпадений на времена, большие шести суток, приведенные в табл. 1, показывают их вполне удовлетворительное согласие как для всей серии инструментальных данных (см. рис. 6), так и для скоростей уменьшения активностей ^{131}I в траве (см. табл. 1).

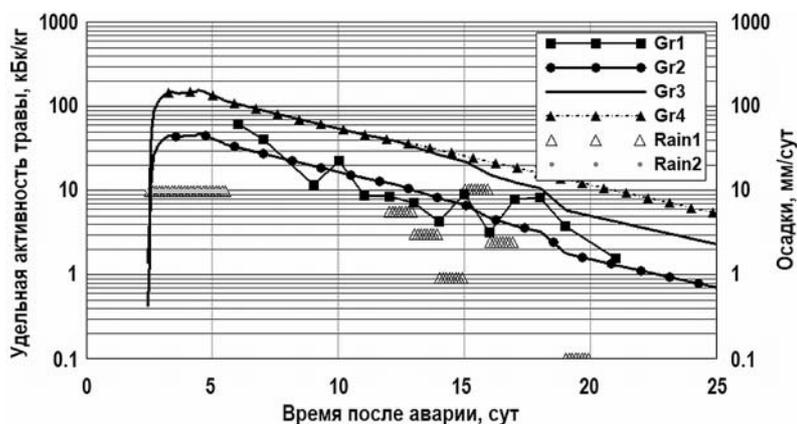


Рис. 6. Динамика «инструментальных» и расчетных данных удельной активности ^{131}I в траве культурных пастбищ с учетом и без учета осадков после 10 сут: Gr1 – «инструментальные» данные для однородного облака; Gr2 – нелинейная интерполяция Gr1; Gr3 – метеоданные об осадках (расчет, неоднородное облако); Gr4 – метеоданные без осадков после 10 сут (расчет, неоднородное облако); Rain1 – интенсивность осадков (метеоданные); Rain2 – интенсивность осадков (метеоданные в период основных выпадений, на большие времена без осадков)

Таблица 1
Скорости уменьшения удельной активности ^{131}I в траве с учетом и без учета осадков после окончания основных выпадений

Данные	Без учета осадков (1)	С учетом осадков (2)	(2) / (1)
«Измерение»	1.15	1.25	1.09
Расчёт	1.17	1.39	1.19
Расчёт / «Измерение»	1.02	1.11	1.09

Представляют интерес результаты сопоставления расчетов для активностей ^{131}I в траве, плотностей выпадений ^{137}Cs и осадков в НП по модели прямого расчета (рис. 6, Gr3) и однородного облака (рис. 6, Gr4), приведенные на рис. 6 и в табл. 2. При увеличении осадков с 7.3 мм/сут за время 4 – 5 сут по метеоданным, а по модели однородно-

го облака до 30 мм за время 2.5 – 5.5 сут расчетная плотность выпадения ^{137}Cs в НП увеличивается в 3.4 раза (колонка σ_{dep}), при этом удельная активность ^{131}I в траве, наоборот, уменьшается в 1.86 раз (колонка Q_{max}).

Таблица 2

К анализу расчетных данных для фермы Brinow bis

Ферма	Brinow bis	Модель	σ_{dep} , кБк/м ²	Осадки*, мм	μ	Q_{max} , кБк/кг
Метеостанция	Brinow	Прямой расчёт	6.92	7.3	0.87	54.8
σ_{dep}	22.7	Неоднородное облако	22.7	7.3	2.49	155.9
Осадки*, мм	7.3	Однородное облако	23.6	30	0.46	29.4

* – Осадки за время основных выпадений (2.5 – 5.5) сут после аварии;
 μ – отношение расчёт/измерение; Q_{max} – максимальная активность травы

Этот результат является прямым отражением физики задержки активности на листовой поверхности растительности при выпадениях с осадками. При увеличении непрерывных осадков скорость осаждения дождевой воды на листовой поверхности растительности быстро уменьшается, а начиная с его определенной величины прекращается совсем за счет полного стекания вновь поступающей влаги на землю. Такая динамика подтверждается сценарными расчетами, в которых осадки за период основных выпадений увеличивались от 0 до 40 мм (рис. 7), из которых видно, что максимальная активность ^{131}I в траве растет с увеличением осадков до 15 мм, а при больших осадках начинает уменьшаться.

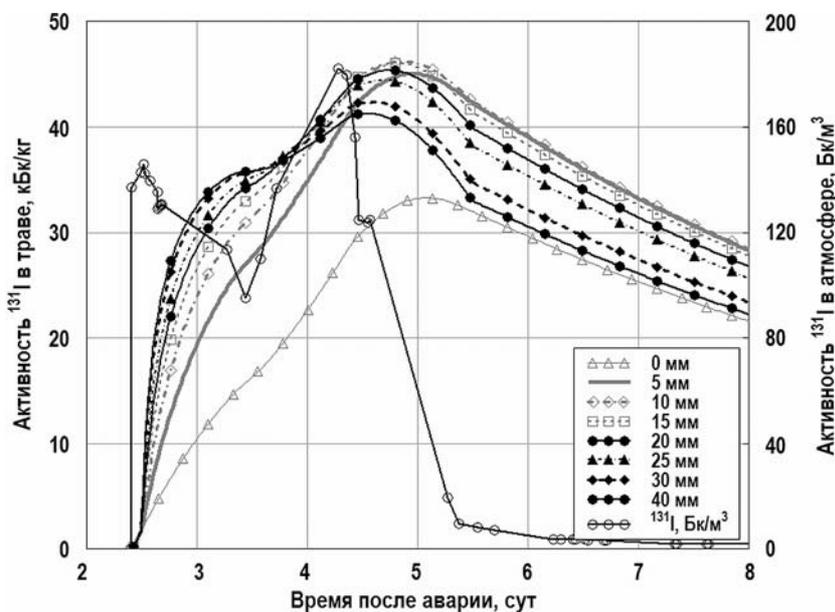


Рис. 7. Сценарный вариант зависимостей расчетных данных удельной активности ^{131}I в траве культурных пастбищ на ферме Brinow bis района Warsaw Area от осадков 0 – 40 мм в период основных выпадений (начало радиоактивных выпадений $\theta_{\text{dep}} = 2.4$ сут; начало осадков $\theta_{\text{rain}} = 2.5$ сут; окончание осадков $\theta_{\text{rain}} = 5.5$ сут)

Здесь время достижения максимальной активности монотонно уменьшается с ростом осадков, однако все равно превышает время появления второго максимума активности

^{131}I в атмосфере.

Более подробные данные на рис. 8 показывают, что максимальная активность ^{131}I в траве растет с 38 до 48 кБк/кг с увеличением осадков за период основных выпадений от 0 до 10 – 15 мм; при дальнейшем их росте до 40 мм активность уменьшается до 42 кБк/кг.

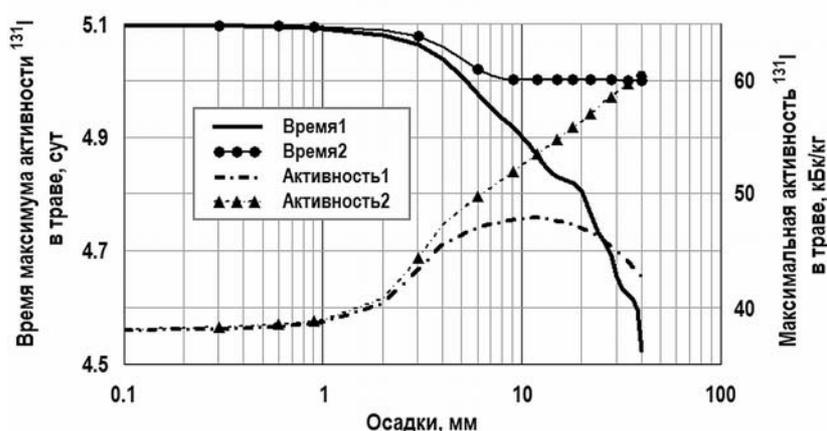


Рис. 8. Сценарный расчет зависимости времени и максимальной удельной активности ^{131}I в траве в виде отношения его максимальной активности к плотности выпадения от осадков с учетом (Время1, Активность1) и без учета (Время2, Активность2) самоочищения травы в период основных выпадений (начало радиоактивных выпадений $\theta_{\text{dep}0} = 2.4$ сут; начало осадков $\theta_{\text{rain}0} = 2.5$ сут; окончание осадков $\theta_{\text{rain}1} = 5.5$ сут). Ферма Brinow bis района Warsaw Area

Время максимума активности ^{131}I в траве незначительно но постоянно уменьшается с ростом осадков: с 5.1 суток при «сухих» выпадениях до 4.5 сут при осадках 40 мм, однако все равно остается больше времени второго максимума активности ^{131}I в атмосфере (см. рис. 7).

Зависимость максимальной активности ^{131}I в траве от величины осадков за период основных выпадений имеет максимум при осадках 10 – 15 мм. Из данных рис. 7 следует, что на времена, большие 4.4 сут, удельная объемная активность ^{131}I в атмосфере начинает быстро уменьшаться. За счет этого при увеличении осадков (в данном случае при осадках больших 20 мм) скорость осаднения активности ^{131}I на поверхность травы становится меньше скорости ее смыва. В результате величина максимальной активности начинает убывать с ростом осадков (см. рис. 8).

Коэффициент задержки (отношение максимальной удельной активности ^{131}I в траве к плотности выпадения ^{137}Cs) также быстро уменьшается с 34 до 1.4 м²/кг при росте осадков с 0 до 40 мм.

Из физики переноса радионуклидов следует прямопропорциональная зависимость между их максимальными активностями во всех ее последовательных элементах пищевой цепочки. С учетом этого невязка δ_{grf}^{CM} в виде отношения расчетных удельных активностей ^{131}I к «инструментальным» данным в траве пастбищ в области их максимальных значений может использоваться для корректировки расчётных данных для молока по соотношению

$$q^{cor}_{milk}(t) = q^c_{milk}(t) / \delta_{grf}^{CM} \quad (1)$$

где $q^c_{milk}(t)$ и $q^{cor}_{milk}(t)$ – прямые и скорректированные расчетные удельные активности радионуклидов в молоке.

Такая же процедура может быть применена и для корректировки расчетных данных динамики поступления радионуклидов в организм человека по пищевому пути и оценок доз его внутреннего облучения.

Поскольку серия «инструментальных» данных удельных активностей ^{131}I в газонной

траве была получена только на участке уменьшения ее активности, величина δ_{grf}^{CM} для пастбищной травы оценивалась по двум выборкам инструментальных данных:

- вариант А – для всей серии «инструментальных» данных;
- вариант Б – усеченная серия для области максимальных значений серии (6 – 9 сут).

Близость к единице абсолютных значений среднегеометрического отношения расчетных данных к «инструментальным» данным позволяет оценить в варианте А возможности имитационной модели по воспроизведению динамики «инструментальных» данных во всем их временном диапазоне. В варианте Б величины этого отношения при их существенных отличиях от единицы могут быть использованы в качестве корректирующих коэффициентов при реконструкции динамики загрязнения молока и далее по цепочке, при реконструкции доз внутреннего облучения человека.

Результаты выполненных расчётов показывают, что расчетные активности ^{131}I в траве пастбищ по моделям прямого расчета и однородного облака хорошо согласуются с «инструментальными» данными, пересчитанными от многолетней газонной травы (табл. 3). Для всей серии «инструментальных» данных и варианта «инструментальных» данных активностей радионуклидов в атмосфере без пересчета размах отношения расчет/измерение равен (0.86 – 0.98) и (0.89 – 0.95) для варианта с их пересчетом. Для модели неоднородного облака это отношение существенно больше единицы, а размах – шире и равен 1.6 – 3.0.

Таблица 3

Среднегеометрические значения μ_G и стандартное отклонение σ_G отношений расчетных к «инструментальным» данным удельных активностей ^{131}I в траве пастбищ для всей временной выборки данных

Молочный район		Warsaw Area		Ostroleka Area	
Модель облака		Прямые данные		Прямые данные	Данные с пересчётом
Растительность		Газонная трава	Трава пастбищ	Трава пастбищ	Трава пастбищ
μ_G	Прямой расчёт	0.88	0.84	0.92	0.89
	Неоднородное облако	1.66	2.74	2.99	1.08
	Однородное облако	0.86	0.89	0.98	0.95
σ_G	Стандартное отклонение	1.69	1.65	1.69	1.69

Таким образом, модели прямого расчета и однородного облака приводят к вполне удовлетворительному согласию расчетных и реконструированных «инструментальных» данных удельной активности ^{131}I в траве пастбищ, пересчитанных от многолетней газонной травы, с величинами среднегеометрических значений среднего и стандартного геометрического отклонения, соответственно равными 0.8 и 2.

ВЫВОДЫ

Пересчёт фактических «инструментальных» данных удельных активностей ^{131}I от многолетней газонной травы к реконструированным «инструментальным» данным для травы культурных пастбищ приводит к лучшему согласию с расчетными данными, чем пересчет от однолетней газонной травы.

Скорость уменьшения «инструментальных» данных, равная 0.21 сут^{-1} , практически совпадает со скоростью уменьшения расчетных данных для многолетней газонной травы, равной 0.23 сут^{-1} .

Зависимость максимальной активности ^{131}I в траве от величины осадков за период основных выпадений имеет максимум при осадках 10 – 15 мм. Время наступления мак-

симула активности ^{131}I незначительно, но постоянно уменьшается с ростом осадков с 5.1 сут при «сухих» выпадениях до 4.5 сут при осадках 40 мм.

Коэффициент задержки ^{131}I на траве (отношение максимальной удельной активности ^{131}I к плотности выпадения ^{137}Cs) уменьшается с 34 до 1.4 м²/кг при увеличении осадков в период основных выпадений с 0 до 40 мм.

Для многолетней газонной травы размах отношений расчет/измерение для всей серии реконструированных «инструментальных» данных для обоих районов одинаков и лежит в диапазоне от 1.0 до 1.3.

Для серии «инструментальных» данных в районе их максимальных значений диапазон отношений расчет/измерение близок к единице (0,7 – 0,8), для варианта однолетней газонной травы это отношение существенно меньше единицы и в среднем равно 0.4.

Стандартное среднегеометрическое отклонение отношения расчетных данных к реконструированным «инструментальным» данным для всех моделей расчета практически постоянно и лежит в диапазоне 1.6 – 1.7.

Полученные значения отношений расчётных данных к реконструированным «инструментальным» данным удельных активностей ^{131}I в пастбищной траве в районе их максимальных значений предполагается использовать для корректировки динамики расчётных активностей ^{131}I в молоке в центральной части Мазовии.

Благодарность

Авторы благодарны Павлу Краевскому (Warsaw, Poland) – руководителю йодной группы проекта МАГАТЭ EMRAS, автору «Варшавского» сценария – за квалифицированную организацию работы группы, в течение которой была выполнена модификация нашей имитационной радиоэкологической модели с использованием созданного им банка уникальных радиоэкологических данных этого сценария.

Литература

1. Власов О.К., Краевский П., Бартускова М., Малатова И., Щукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А., Звонова И.А. Создание и верификация взаимосогласованной базы входной информации имитационной модели транспорта радионуклидов ^{137}Cs и ^{131}I по пищевой цепочке на инструментальных радиоэкологических данных (по материалам «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS). // Радиация и риск. – 2019. – Т. 28. – № 3. – С. 5-23. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2019-28-3-5-23>.
2. Власов О.К., Краевский П., Звонова И.А., Бартускова М., Малатова И., 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: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-4-6-17>.
3. Власов О.К., Звонова И.А., Краевский П., Щукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А. Реконструкция параметров радиоэкологической модели по результатам мониторинга радиационной обстановки в Мазовии после аварии на ЧАЭС (по материалам «Варшавского» сценария проекта МАГАТЭ EMRAS). // Радиационная гигиена. – 2020. – Т. 13. – № 4. – С. 26-33. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-4-26-33>.
4. Власов О.К., Звонова И.А., Краевский П., Щукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А. Радиологическое моделирование динамики активности ^{131}I в травяной растительности разных видов в год аварии на ЧАЭС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. – № 4. – С. 106-116. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.4.10>.
5. 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 модели. // Радиация и

риск. – 2013. – Т. 22. – № 2. – С. 16-34.

6. 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.

7. Krajewski P., Ammann M., Bartuskova M., Duffa C., Filistovic V., Homma T., Kanyar B., Malatova 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. // Applied Radiation and Isotopes. – 2008. – Vol. 66. – No. 11. – PP. 1730-1735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2007.11.022>.

8. Bartuskova M., Malatova I., Berkovskyy V., Krajewski P., Ammann M., Filistovic V., Homma T., Horyna J., Kanyar 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. 295-300. DOI: <https://doi.org/10.1051/radiopro/20095057>.

9. 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. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2010. – Vol. 101. – No. 1. – PP. 8-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.08.005>.

Поступила в редакцию 12.04.2022 г.

Авторы

Власов Олег Константинович, заведующий лабораторией, д-р техн. наук

E-mail: voleg2003@yahoo.com, vlasov@nrer.ru

Звонова Ирина Александровна, главный научный сотрудник, д-р техн. наук

E-mail: iz_zv@bk.ru

Щукина Наталия Владиленовна, старший научный сотрудник

E-mail: shchukina@nrer.ru

Чекин Сергей Юрьевич, заведующий лабораторией

E-mail: chekin@nrer.ru

UDC 546.15 (438+437):621.039.586(477.41)

Radioecological Simulation of the ¹³¹I Activity Dynamics in the Pasture Vegetation of Mazovia in the Year of the Chernobyl Accident: Reconstruction, Verification, Reliability Assessments

Vlasov O.K.*, Zvonova I.A.**, Schukina N.V.*, Chekin S.Yu.*

* A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation

4 Koroleva Str., 249035 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

** P. Ramzaev FSO Research Institute of Radiation Hygiene

8 Mira Str., 197101 Saint-Petersburg, Russia

ABSTRACT

A radioecological model, which is a system of linear differential equations describing the dynamics of the transport of ¹³⁷Cs and ¹³¹I radionuclides along the food chain after their release into the atmosphere after the Chernobyl accident, was used to reconstruct «instrumental» data of the ¹³¹I activities in the grass pastures in the central part of

Mazovia. Four atmospheric models were used for the reconstruction: direct calculation, homogeneous cloud – inhomogeneous rainfall, inhomogeneous cloud – homogeneous rainfall, and a model with recalculation of the ^{137}Cs and ^{131}I activities in the atmosphere. The «instrumental» data were reconstructed based on data from direct measurements of the ^{131}I activity in lawn grass. It has been shown that the direct calculation and homogeneous cloud models lead to a better agreement of the calculated and reconstructed «instrumental» data than the inhomogeneous cloud model. The arithmetic mean ratio of the calculated and reconstructed «instrumental» data lie in a range of 0.84 to 0.95 for the direct calculation and homogeneous cloud models, and in a range of 1.7 to 3.0 for the inhomogeneous cloud model. The mean geometric deviation for all models is constant and equal to 1.7. Instrumental and reconstructed «instrumental» data show a significant decrease in the specific activity of ^{131}I in grass due to its wash-off by continuous rainfall, both during rainfall and after most of the deposition takes place. Due to this effect, the coefficient of the ^{131}I retention on grass in the form of the maximum activity ratio to the ^{137}Cs deposition density decreases from 34 to 1.4 m^2/kg while it increases from 1 to 29 kBq/m^2 as the result of the rainfall growth from 0 to 40 mm.

The authors thank Dr. Pawel Krajevski (Warsaw, Poland), Head of the Iodine Group of the IAEA EMRAS project, the author of the Warsaw Scenario, for organizing our team work at a high professional level. For the work, we could use a unique radioecological data bank for the Warsaw scenario created by Dr. P. Krajevski. As a result of the work, we were able to modify our radioecological simulation model.

Key words: Chernobyl accident, IAEA's EMRAS project, Warsaw scenario, agro-radioecological simulation model, radioactive cloud model, ^{137}Cs deposition densities, atmospheric ^{131}I forms, radioecological model verification.

Vlasov O.K., Zvonova I.A., Schukina N.V., Chekin S.Yu. Radioecological Simulation of the ^{131}I Activity Dynamics in the Pasture Vegetation of Mazovia in the Year of the Chernobyl Accident: Reconstruction, Verification, Reliability Assessments. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 2, pp. 107-120; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.09> (in Russian).

REFERENCES

1. Vlasov O.K., Krajevski 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 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*. 2019, v. 28, no. 3, pp. 5-23; DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2019-28-3-5-23> (in Russian).
2. Vlasov O.K., Krajevski 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). *Radiacionnaya Gigiena*. 2019, v. 12, no. 4, pp. 6-17; DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-4-6-17> (in Russian).
3. Vlasov O.K., Zvonova I.A., Krajevski P., Schukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A. Reconstruction of Radio-Ecological Model Parameters Based on the Results of Monitoring the Radiation Situation in Mazovia After the Chernobyl Accident (Based on the Warsaw Scenario of the IAEA EMRAS Project). *Radiacionnaya Gigiena*. 2020, v. 13, no. 4, pp. 26-33; DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-4-26-33> (in Russian).
4. Vlasov O.K., Zvonova I.A., Krajevski P., Schukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A. Radioecological Simulation of the ^{131}I Activity Dynamics in Different Types of Grass Vegetation in the Chernobyl Accident Year. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2020,

- no. 4, pp. 106-116; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.4.10> (in Russian).
5. 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*. 2013, v. 22, no. 2, pp. 16-34 (in Russian).
6. 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.
7. Krajewski P., Ammann M., Bartuskova M., Duffa C., Filistovic V., Homma T., Kanyar B., Malatova I., Nedveckaite T., Simon S., Vlasov O., Webbe-Wood D., Zvonova I. Validation of Environmental Transfer Models and Assessment of the Effectiveness of Counter Measures Using Data on ¹³¹I Releases From Chernobyl. *Applied Radiation and Isotopes*. 2008, v. 66, no. 11, pp. 1730-1735; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2007.11.022>.
8. Bartuskova M., Malatova I., Berkovskyy V., Krajewski P., Ammann M., Filistovic V., Homma T., Horyna J., Kanyar 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, no. 5, pp. 295-300; DOI: <https://doi.org/10.1051/radiopro/20095057>.
9. 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. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2010, v. 101, no. 1, pp. 8-15; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.08.005>.

Authors

Oleg K. Vlasov, Head of Laboratory, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: voleg2003@yahoo.com; vlasov@nrer.ru

Irina A. Zvonova, Chief Researcher, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: iz_zv@bk.ru

Nataliya V. Shchukina, Senior Researcher

E-mail: shchukina@nrer.ru

Sergey Yu. Chekin, Head of Laboratory

E-mail: chekin@nrer.ru