

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОУРОВНЕВЫХ АДАПТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ДОЗ

В.И. Диденко*, Б.И. Яцало*, Г.Я. Брук, В.Ю. Голиков****

** Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, г. Обнинск*

*** Институт радиационной гигиены, г. Санкт-Петербург*



Приведены результаты анализа структуры доз облучения населения радиоактивно загрязненных территорий Брянской области с использованием компьютерных систем *DoseApplication* и ГИСППР *PRANA*. Представлено краткое описание многоуровневых адаптивных моделей оценки доз, реализованных в составе указанных компьютерных систем.

ВВЕДЕНИЕ

В начальный период после аварии на Чернобыльской АЭС радиационное воздействие определялось короткоживущими радионуклидами, наиболее опасным из которых являлся ^{131}I . В юго-западных районах Брянской и Калужской областей России концентрация йода в молоке в первые недели после аварии в десятки раз превышала допустимые уровни и составляла порядка 0.04-0.4 МБк/л [1, 2]. При этом, основными источниками излучения являлись: взвешенные в воздухе радиоактивные частицы, загрязненная поверхность земли, а также радионуклиды, попавшие в организм через органы дыхания или желудочно-кишечный тракт (ЖКТ).

В отдаленный период после аварии основную роль в формировании дозы облучения населения Брянской области играют радионуклиды ^{137}Cs (в первые годы после аварии учитывались также радионуклиды ^{134}Cs). Согласно проведенным оценкам, вклад ^{90}Sr в суммарную дозу облучения населения области в среднем не превышает 1-3% [3]. Особая опасность радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr обусловлена их высокой подвижностью в природных средах, а также ядерно-физическими свойствами, особенностями накопления и распределения по органам и тканям в организме человека. В этот период внешнее облучение от поверхности земли и внутреннее облучение от потребления загрязненных продуктов питания являются основными путями облучения населения.

Масштабное загрязнение используемых для проживания и ведения сельского хозяйства территорий стимулировало разработку целого ряда моделей оценки последствий радиоактивного загрязнения, ключевыми из которых являются модели оценки доз внешнего и внутреннего облучения населения. При этом, как пра-

© В.И. Диденко, Б.И. Яцало, Г.Я. Брук, В.Ю. Голиков, 2004

вило, указанные модели используются в составе компьютерных систем различного уровня сложности, в том числе и в системах поддержки принятия решений [4].

АДАПТИВНЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ

В рамках работ по созданию геоинформационной системы поддержки принятия решений (ГИСППР) *PRANA* разработан целый ряд компьютерных приложений для оценки последствий загрязнения территории долгоживущими радионуклидами (^{137}Cs , ^{90}Sr) на примере пяти наиболее пострадавших районов Брянской области (Новозыбковский, Клиновский, Гордеевский, Красногорский и Злынковский) [5, 6]. Ключевыми являются приложения, реализующие модели оценки загрязнения сельскохозяйственной продукции, доз внешнего и внутреннего облучения населения, а также радиационного риска и анализа защитных мероприятий (контрмер).

Для оценки доз внешнего облучения местного населения используются усовершенствованные модели, позволяющие рассчитывать (средние) дозы для различных социально-возрастных групп, с учетом структуры жилого фонда и особенностей поведения в радиационном поле. Всего рассматривается пять основных социально-возрастных групп населения (индекс i): дошкольники, школьники, пенсионеры, офисные рабочие и уличные рабочие. Среднегодовая эффективная доза внешнего облучения E_i (Зв/год) для представителя i -ой группы населения определяется следующим образом:

$$E_i(t) = k_{sn} d(t) k_i \sum_j f_j p_{ij} \quad (1)$$

$$d(t) = A^{137} r(t) \left[g_{137} \exp(-\lambda^{137} t) + g_{134} \frac{A^{134}}{A^{137}} \exp(-\lambda^{134} t) \right], \quad (2)$$

где k_{sn} – параметр учета влияния снежного покрова на величину среднегодовой дозы внешнего облучения; $d(t)$ – мощность поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м над поверхностью земли, Гр/год; k_i – коэффициент перехода от поглощенной дозы в воздухе к эффективной эквивалентной дозе в теле человека для i -ой группы населения (школьники $k=0.8$, дошкольники $k=0.9$, взрослые $k=0.75$), Зв/Гр; f_j – фактор места (location factor), p_{ij} – фактор занятости (occupancy factor) – доля времени пребывания для представителей i -ой группы населения на j -ом типе местности, $\sum_j p_{ij} = 1$; A^{137} – плотность поверхностного загрязнения почвы радионуклидами ^{137}Cs , кБк/м²; $r(t)$ – функция двухэкспоненциального вида описывающая уменьшение мощности дозы в воздухе со временем вследствие миграции радионуклидов цезия в почву; g_{134} , g_{137} – отношение мощности поглощенной дозы в воздухе к поверхностной активности для контрольного [3] распределения радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs в почве, (Гр/год)/(кБк/м²); λ^{134} , λ^{137} – константы радиоактивного распада. Значения параметров модели определены в работе [3].

Помимо базовой модели оценки доз внешнего облучения, реализована версия модели, адаптированная для использования в ГИСППР *PRANA* и отличающаяся широкими возможностями формирования ареала пребывания представителей i -ой группы населения для конкретных населенных пунктов (НП) и его окрестностей. Ареал пребывания определяется посредством привязки полигонов (территории самого НП, близлежащих пастбищ, сенокосов, пахотных угодий, лесных массивов и др.) к данному НП; при этом могут быть использованы различные алгоритмы привязки (по заданному расстоянию от НП, по принадлежности к хозяйству, а также по выбору пользователя/эксперта). Данный подход позволяет проводить ана-

лиз широкого класса сценариев оценки доз населения на локальном уровне, что особенно важно в случаях неоднородной структуры загрязнения и/или применения защитных мероприятий.

Для оценки типа и параметров распределения индивидуальных доз внешнего облучения населения исследуемого региона была разработана вероятностная версия модели (1), (2). В ней используется та же система уравнений, что и в базовой модели, но при этом каждый из параметров является распределенной/случайной величиной. Указанный подход позволяет получить в качестве результата оценку распределения индивидуальных доз облучения населения. Определение типа и параметров распределения каждого из параметров модели было основано на результатах полевых исследований, выполненных в течение 10 лет после Чернобыльской аварии [3]. Необходимо подчеркнуть, что вероятностный подход используется, прежде всего, для анализа неопределенностей модельных оценок доз населения (см. также [7], где рассматривается проблематика использования вероятностных методов при проведении радиологических исследований).

Для оценки доз внутреннего облучения населения от потребления (местной) продукции, загрязненной долгоживущими радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr , применяется следующая базовая модель:

$$H(t) = d_{137} \sum_j k_j^{137} C_j^{137}(t) V_j + d_{90} \sum_j k_j^{90} C_j^{90}(t) V_j, \quad (3)$$

где $H(t)$ – эффективная доза внутреннего облучения, Зв/год, d_{137} , d_{90} – дозовые коэффициенты для пищевого поступления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr соответственно, Зв/Бк [3]; k_j^{137} , k_j^{90} – коэффициенты, учитывающие кулинарную и технологическую обработку j -го продукта питания, C_j^{137} , C_j^{90} – средняя концентрация радионуклидов цезия и стронция соответственно в j -ом продукте питания, Бк/кг, V_j – потребление j -го продукта питания, кг/год.

Параметры модели (d , V) зависят от возрастной группы, для которой проводится оценка. При реализации моделей оценки доз внутреннего облучения учитывались следующие основные категории/группы населения:

- для среднего (взрослого) человека;
- для пяти возрастных групп: от 0 до 1 года, от 1 до 8 лет, от 8 до 12 лет, от 12 до 17 лет и старше 17 лет.

Как и в случае с оценкой доз внешнего облучения, для анализа неопределенностей модельных оценок доз внутреннего облучения используется вероятностная модель, основанная на уравнении (3), в котором ключевые переменные и параметры (C_j, V_j) рассматриваются распределенными/случайными величинами.

Для реализации адаптивных моделей оценки доз внешнего и внутреннего облучения были разработаны процедуры настройки ключевых параметров базовых моделей на соответствующие данные мониторинга. В основе указанных процедур лежит использование метода наименьших квадратов с учетом ограничений на граничные значения параметров настройки. В общем виде задача настройки моделей формулируется следующим образом:

$$U(r_1 \dots r_m) = \sum_{i=1}^n (h_i - H_i(r_1 \dots r_m))^2 \rightarrow \min, r_j^{\min} \leq r_j \leq r_j^{\max}, j = 1 \dots m, \quad (4)$$

где $U(r)$ – целевая функция, h_i – данные мониторинга для населенного пункта i (индивидуальные дозы внешнего/внутреннего облучения), $H_i(r_1 \dots r_m)$ – функция, зависящая от параметров настройки r_j .

В качестве параметров настройки для моделей оценки доз внешнего облучения используются факторы занятости p_{ij} , а для моделей оценки доз внутреннего облучения – значения компонент рациона питания ($V_1 \dots V_m$) для населения данно-

го НП или группы НП. Таким образом, адаптивные модели оценки доз позволяют улучшить качество модельных оценок за счет более адекватного учета параметров моделей применительно к конкретному объекту исследования.

ОЦЕНКА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

Эффективная доза облучения населения является одним из основных критериев оценки состояния окружающей среды и сферы жизнедеятельности человека [8]. Территории со среднегодовой (эффективной) дозой облучения населения, не превышающей 1 мЗв, считаются безопасными для проживания и хозяйственной деятельности человека. При дополнительной дозе облучения от 1 до 5 мЗв/год загрязненная территория определяется как зона радиационного контроля. В этой зоне должны проводиться мероприятия по снижению дозы на основе принципа оптимизации радиационной защиты. Если доза составляет от 5 до 20 мЗв/год, то территория определяется как зона ограниченного проживания населения.

Для Новозыбковского, Клинцовского, Гордеевского, Красногорского и Злынковского районов Брянской области, в соответствии с официальными данными за 1999 г., средняя годовая эффективная доза облучения 15% населения меньше или равна 1 мЗв, 84% населения подвергается дополнительному облучению с дозой от 1 до 5 мЗв/год и доза облучения около 1% населения не превышает 20 мЗв/год. При этом, вклад в дозу различных источников неодинаков. Представленная на рис. 1 гистограмма вклада внутреннего облучения в суммарную дозу позволяет сделать вывод о большей значимости данного источника облучения для населения Брянской области в настоящее время. Для более чем 80% населенных пунктов вклад внутреннего облучения в суммарную дозу превышает 50%. При этом, почти для 10% из них эффективная доза на 90% определяется внутренним облучением.

Результаты модельных оценок средневзвешенных по НП эффективных доз облучения сельского населения в 2004, 2010 и 2030 гг., выполненные с использованием ГИСППР *PRANA*, представлены в табл. 1.

Для каждого из годов в таблице приведены два значения – доза без использования КМ а), а также доза после использования сельскохозяйственных КМ и запретов на потребление продукции с загрязнением больше установленных нормативов (СанПин-2001) б). Сценарий проведения защитных мероприятий включает следующие основные меры (в случае загрязнения продукции выше установленных СанПин-2001 нормативов): на естественных угодьях – коренное улучшение пастбищ и сенокосов; на пашне – известкование.

Из приведенных данных видно, что наиболее неблагоприятная радиоэкологи-

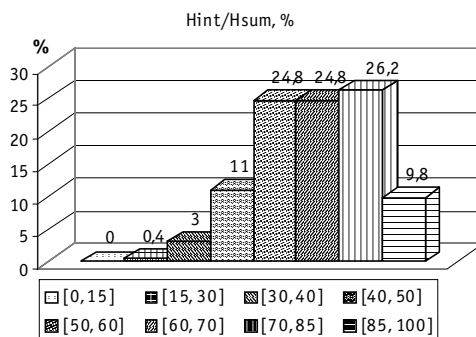


Рис.1. Гистограмма вклада внутреннего облучения (H_{int}) в суммарную дозу облучения (H_{sum}) населения Брянской области (по официальным данным о средних по НП пяти районов Брянской обл. дозах внутреннего и внешнего облучения за 1999 г.)

Таблица 1

Оценка средней суммарной эффективной дозы облучения сельского населения Брянской области в 2004, 2010 и 2030 гг. а без и б) после проведения контрмер (КМ)

	Официальные данные, 2001 г., мЗв/год	2004 год, мЗв/год		2010 год, мЗв/год		2030 год, мЗв/год	
		а)	б)	а)	б)	а)	б)
Пять районов	1.4	1.5	0.7	1.1	0.6	0.5	0.3
Новozyбковский	2.3	2.6	1.04	1.9	0.9	0.8	0.4
Клинцовский	0.8	0.8	0.4	0.6	0.33	0.3	0.2
Гордеевский	1.5	2.1	0.8	1.5	0.7	0.6	0.3
Красногорский	1.4	1.1	0.7	0.9	0.52	0.5	0.3
Злынковский	1.9	1.8	0.79	1.34	0.81	0.6	0.4

ческая обстановка наблюдается в Новозыбковском, Гордеевском и Злынковском районах Брянской области. Взвешенная, с учетом количества населения в НП доза облучения, здесь составляет 2.6 мЗв/год, 2.1 мЗв/год, 1.8 мЗв/год соответственно. Применение контрмер по сценарию б) приводит к уменьшению дозы в среднем более чем на 50% в 2004 г.

Интересно отметить тот факт, что в ряде случаев величина дозы после КМ практически не уменьшается с течением времени, а в некоторых случаях даже увеличивается. Например, средняя эффективная доза облучения после КМ для Злынковского района в 2004 г. составляет 0.79 мЗв/год, а в 2010 г. – 0.81 мЗв/год. Основной причиной появления указанного эффекта является (возможное) увеличение доли “чистой” местной продукции (т.е. продукции с загрязнением ниже установленных нормативов) в рационе населения вследствие применения КМ и/или увеличение среднего загрязнения “чистой” продукции в результате применения сельскохозяйственных КМ. Более подробно данный эффект рассмотрен в работах [7, 9].

Значение дозы внутреннего облучения зависит от многих факторов, включая количественный и качественный состав рациона питания человека, а также от загрязнения продукции растениеводства и животноводства. Проведенные оценки вклада основных компонент рациона питания в дозу внутреннего облучения населения Брянской области позволили выявить следующие закономерности:

- основными дозообразующими продуктами питания для населения Брянской области являются молоко и дары леса (грибы, ягоды);
- вклад молока в дозу внутреннего облучения сельского населения Брянской области в среднем составляет около 40%;
- вклад грибов и ягод в дозу внутреннего облучения сельского населения со-

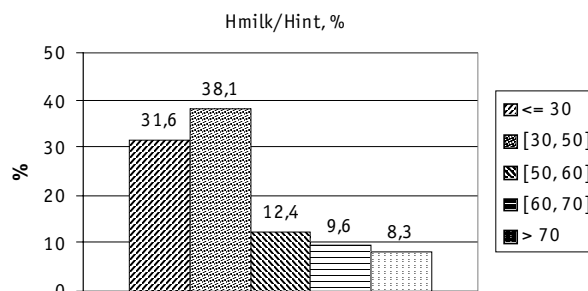


Рис.2. Относительный вклад молока (H_{milk}) в дозу внутреннего облучения (H_{int}) сельского населения Брянской области, 2004 г.

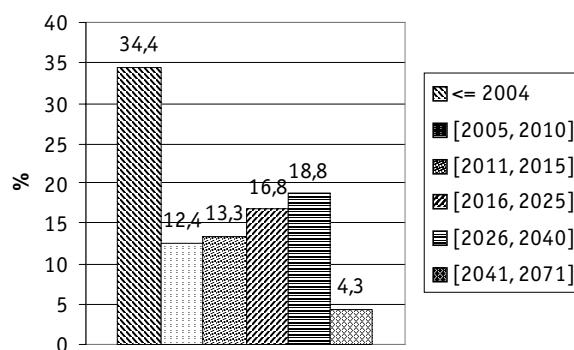


Рис.3. Распределение сельских НП Брянской области по временным интервалам, когда среднегодовая эффективная доза облучения населения станет меньше (или равна) 1 мЗв

ставляет в среднем около 48%.

Особый интерес представляет распределение населенных пунктов Брянской области по временным интервалам, когда доза облучения населения станет меньше 1 мЗв/год. Результаты соответствующих расчетов представлены на рис. 3.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие основные выводы:

- более 30% НП к настоящему времени характеризуются значением эффективной дозы облучения населения меньшей 1 мЗв/год;
- к 2010 г. доза облучения населения еще примерно в 12% НП станет меньше 1 мЗв/год;
- в период от 2010 до 2040 гг. доза облучения населения в большинстве оставшихся НП (около 50%) станет меньше 1 мЗв/год;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный комплекс программных средств (блок оценки доз ГИСППР PRANA, автономная компьютерная система *DoseApplication*) позволяет проводить всесторонний анализ структуры доз внешнего и внутреннего облучения населения Брянской области. При этом учитываются особенности загрязнения рассматриваемых территорий, структура жилого фонда НП и социально-возрастной состав населения, а также количественные и качественные параметры рационов питания местного населения, характерные для рассматриваемых НП.

В качестве инструментальной среды разработки программных модулей использовался C++Builder; для хранения и обработки исходных данных применяются настольная СУБД Paradox и серверная СУБД Interbase; для создания электронных карт рассматриваемой территории, а также представления исходных данных и модельных оценок использовались возможности картографического пакета ArcGIS 8.1.

Литература

1. Козьмин Г.В., Круглов С.В., Курганов А.А., Яцало Б.И. и др. Ведение сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения: Учебное пособие. – Обнинск: ИАТЭ, 1999. – 188 с.
2. Guntay S., Powers D.A., Devell L. The Chernobyl reactor accident source term: development of a consensus view / One decade after Chernobyl: Summing up the consequences of the accident. V.2. IAEA-TECDOC-964, 1996.
3. Golikov V., Balonov M., Erkin V., Jacob P. Model validation for external doses due to environmental contamination by the Chernobyl accident // Health Physics. – 1999. – V. 77. – № 6. – P. 654-661.
4. Baverstam U., Fraser G. and Kelly G.N. (Eds) Decision Making Support for Off-site Emergency Management // Radiat. Prot. Dosim. 73(1-4) (1997).
5. Yatsalo B., Mirzeabassov O., Okhrimenko I., Pichugina I., Kulagin B. PRANA – Decision Support System for Assessment of Countermeasure Strategy in the Long-term Period of Liquidation of the

Consequences of a Nuclear Accident (Agrosphere)//Radiat. Prot. Dosim. – 1997. – V.73. – №№ 1-4. – P. 291-294.

6. Яцало Б.И., Пичугина И.А., Козьмин Г.В., Мирзеабасов О.А., Охрименко И.В., Каневский М.Ф., Савельева Е.А. Геоинформационная система радиоактивно загрязненных территорий//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2001. – № 3. – С. 57-61.

7. Яцало Б.И. Эффективность защитных мероприятий в условиях неоднородного загрязнения с/х продукции//Атомная энергия. – 1994. – Т.76. – Вып. 6. – С. 526-530.

8. Нормы радиационной безопасности (НРБ – 99). Ионизирующее излучение. Радиационная безопасность. /СП 2.6.1.758-99. М.: Минздрав России, 1999. – 115 с.

9. Yatsalo B.I. Can agricultural countermeasures lead to an increase in population doses? /Proc. of the 1996 Intern. Congr. on Rad. Prot. IRPA9 (April 14-19, 1996). - V.3. - P. 256.

Поступила в редакцию 8.09.2003

УДК 621.039.56

Mathematical Simulation of Dose Fields in the Planning of Repair Stuff Irradiation \O.L. Tashlykov, S.Ye. Sheklein, N.I. Markelov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 6 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles.

The article shows a role of scheduling stage in optimizing cycle of repairing works, and methods to forecast radiation doses of the stuff. The dose imitation problems related with dose rate determination in the different points of working space and time in the corresponding radiation fields was shown. Design data for distribution of dose ratio fields from surface and line sources is listed.

УДК 621.039.56

Radiation Factor in the Problem of APR Use Ratio Improvement \S.Ye. Sheklein, O.L. Tashlykov, N.I. Markelov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 9 pages, 6 illustrations. – References, 6 titles.

The analysis of power use ratio is carried out for atomic power plants (APP) at Russia and abroad. APP under repair stoppage dependence on staff irradiation is shown. The problem of dose expenditures reduction for APP staff because of switching to radiation standards requirement NRB-99 of stuff irradiation reduction as much as 2,5 times was formulated. The repair personnel irradiation analysis was carried out for Russian APP.

Repair work optimization problems have been considered at the following stages: scheduling, work preparation, execution, work assessment and back-coupling. Key problems in the efficiency improvements of repair services for APP systems and equipment, which connected with repair personnel irradiation reduction was covered.

УДК 539.16.04: 502.3

Dose Analysis for the Population of Radioactive Contaminated Territories with the Use of Multilevel Adaptive Dose Models \V.I. Didenko, B.I. Yatsalo, G.Y. Bruk, V.Yu. Golikov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 7 pages, 3 illustrations, 1 table. – References, 9 titles.

The structure of external and internal doses to the population of the most radioactive contaminated districts of Bryansk region is considered. Model assessments of effective doses for 2003, 2010 and 2030 as well as the contribution of external/internal doses into total dose have been carried out. A brief description of multilevel adaptive dose models realised within stand-alone computer system DoseApplication and PRANA GIS-DSS are presented.

УДК 574: 621.039

The Estimate of Ecological Risk for Ground Ecosystems in Case of Nuclear Power Plant Failures \D.Y. Kremlenkov, M.Y. Kremlenkov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 8 pages, 3 tables. – References, 8 titles.

The estimate of probabilistic damage to forest- and agro-ecosystems from Caesium-137 and Strontium-90 emergency pollution in case of nuclear power plant failures is carried out. This estimate is based on radio-ecological risk conception, which involves application of radioactive substances distribution models in atmosphere, as well as calculation of absorbent radiation dose in critical ecosystem groups.

It is shown a radio-ecological damage defined in ecosystem's destruction aria and dependence of such damage on the scale of radionuclid emergency pollution, weather conditions and radio-stability of critical groups of plant communities. On the assumption of dose diapason from MELD to ELD, ecological risk defined in probable ecosystem's destruction aria is estimated: for Caesium-137 pollution about 2% of coniferous forest and from 4 to 9% of deciduous forest; for Strontium-90 pollution from 2 to 4% of agricultural crop.