

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ДОЗИМЕТРИЯ

УДК 574:539.074

### СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ДОЗИМЕТРИИ

© 2009 г. Е. В. Спирин\*

ГНУ ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии РАСХН, Обнинск

Дан анализ различных методологических подходов к построению системы защиты окружающей среды по отношению к биоте, а также состояния дозиметрических исследований в оценке действия источников ионизирующих излучений на живые организмы при загрязнении окружающей среды. Дан перечень факторов, влияющих на качество дозиметрических моделей. Подчеркивается необходимость учета радиобиологических и биологических особенностей организмов в построении дозиметрических моделей.

*Защита окружающей среды, дозиметрия, биота, ионизирующие излучения.*

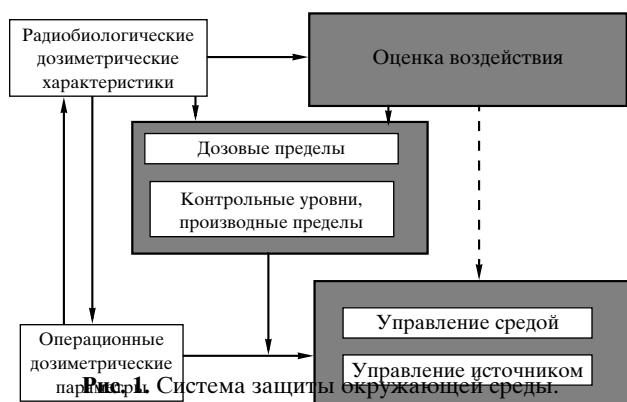
С возникновением атомной энергетики, проведением испытаний ядерного оружия и широким внедрением радиоизотопных технологий в хозяйственную деятельность человека на Земле появился новый техногенный радиационный фактор, небезразличный для биосфера. После обнаружения и исследования эффектов поражающего и вредного воздействия ионизирующих излучений на живые организмы была создана и развита система защиты человека, обеспечивающая радиационную безопасность как персонала, работающего с источниками, так и населения, подвергающегося облучению при выбросе радиоактивных веществ в окружающую среду. По мере накопления информации о действии ионизирующих излучений на разные виды живых организмов, данных мониторинга о загрязнении окружающей среды и результатов исследования последствий радиационных аварий стал возрастать интерес к проблеме защиты всего живого, а не только человека. Несмотря на то что для человека были установлены дозовые пределы облучения, обеспечение которых, казалось бы, является достаточной гарантией защиты всех остальных видов биоты, в последние десятилетия этот интерес стал воплощаться в конкретные разработки методологических подходов к оценке воздействия на окружающую среду, контрольных уровней допустимого воздействия на биоту, а в целом – в разработку системы радиационной защиты окружающей среды.

В общем виде система защиты окружающей среды, как и система защиты человека, включает в себя три основных блока задач (рис. 1): блок оценки воздействия, блок установления границ допустимого воздействия на живые организмы и

блок, где принимаются решения по управлению источником и средой.

Дозиметрия – инструмент, который обеспечивает решение задач в этих блоках. В первом блоке определяют связь между дозовой нагрузкой и величиной эффекта. На основе выявленной зависимости во втором блоке задач устанавливают нормы допустимого воздействия по выбранному эффекту.

Система радиационной защиты предполагает проведение радиационного контроля. При радиационном контроле проводится определение характеристик поля излучения. Поскольку биологический объект искажает поле излучения, переход от характеристик радиационного поля к нормируемым дозовым величинам может быть осуществлен либо математическим моделированием, либо соответствующей градуировкой измерительных приборов. В итоге мы получим операционные дозиметрические величины, которые, с одной стороны, близки к радиобиологическим характеристикам, а с другой – могут быть измерены. На основе сравнения операционных величин с установленными нормативами в управлении



\* Адресат для корреспонденции: Обнинск Калужская обл., 249032 Киевское ш., 109 км, ВНИИСХРАЭ; тел.: (48439) 9-69-60; e-mail: Spirin@rias.obninsk.org.



Рис. 2. Схемы методов “Референтной фауны и флоры” и “Стандартов предельных доз”.

ском блоке задач принимаются решения о воздействии на источник или окружающую среду.

Поскольку все зависимости доза-эффект получены в экспериментальных условиях, чтобы разработать такие нормативы, необходимо решить отдельную задачу по переходу от дозовых нагрузок в эксперименте к нормируемым дозовым характеристикам в окружающей среде при условии образования равнозначных эффектов радиационного воздействия. Эта задача по нормализации данных должна решаться с помощью как радиобиологических, так и дозиметрических моделей. Первый тип моделей, например, должен обеспечить переход от острого облучения в эксперименте к хроническому облучению, а второй должен установить соответствие между поглощенной дозой в критическом органе в условиях изотропного падения излучения на объект в окружающей среде и поглощенной дозой при неизотропном облучении, например, от точечного источника в эксперименте.

Наиболее значимые факторы, влияющие на нормализацию данных экспериментального облучения:

- режим облучения (острое, хроническое);
- режим поступления радионуклидов внутрь организма;
- условия облучения (одностороннее, равномерное);
- вид излучения;
- свойства объекта (наличие критических органов и их неоднородная чувствительность к излучению, ростовые процессы, время жизни);
- геометрия и размеры объекта.

При загрязнении окружающей среды для оперативного проведения радиационного контроля кроме основных дозовых нормативов разрабатываются дополнительные, производные от основных. В качестве таких производных пределов мо-

гут выступать не только дозиметрические характеристики поля излучения, но и содержание радионуклидов в объектах окружающей среды, или в самом биологическом объекте.

Переход от основных дозовых пределов к производным пределам или контрольным уровням осуществляют с помощью дозиметрических моделей, которые для человека достаточно хорошо разработаны. В случае с биотой мы имеем дело не с одним биологическим объектом, здесь необходимо рассматривать совокупность видов живых организмов, в разных комбинациях входящих в разные типы экосистем. В связи с этим дозиметрическое обеспечение системы защиты биоты представляется чрезвычайно сложной задачей как в блоке, где требуется установить связь между дозовой нагрузкой и радиобиологическим эффектом, так и в блоках установления дозовых пределов и определения операционных величин. Выход из этой ситуации возможен либо путем изменения методологии решения задач в каждом блоке, по сравнению с человеком, либо путем значительных упрощений, приводящих к избыточной консервативности дозовых оценок.

В настоящее время наибольший интерес представляют два подхода к построению системы защиты окружающей среды: метод “референтной фауны и флоры” и метод “стандартов предельных доз” в совокупности со скринингом оценки радиационного воздействия на экосистемы (рис. 2). Первый воплотился в ряде проектов Европейской комиссии (FASSET, EPIC и др.) [1]. Другой подход осуществляется в практике защиты окружающей среды в США в виде стандартов, принятых Департаментом энергетики и скрининговой методологии оценки радиационной ситуации в загрязненном регионе [2].

Подход, связанный с оценкой доз на референтную фауну и флору, отталкивается от объекта, в то время как при скрининге исходной точкой от-

счета для оценки воздействия являются источник и его радиационные характеристики. В первом случае создается ограниченный набор дозиметрических моделей для отдельных представителей биоты, с помощью которых могут быть определены виды живых организмов с наибольшими дозовыми нагрузками в той или иной радиологической ситуации. Здесь вопрос о критичности объектов в загрязненной экосистеме решается на первой стадии выбора референтных видов живого. Это один из недостатков методологии с точки зрения применения в практике оценки воздействия на окружающую среду и установления дозовых пределов для различных экосистем, так как при несоответствии с видами биоты в реальной экосистеме возникает неопределенность при экстраполяции с одного вида на другой. Между тем в соответствии с анализом, проведенным в работе Жаклин Гарнье-Лаплас и др. [3], этот вид неопределеностей наибольший, по сравнению с экстраполяцией данных, полученных при остром облучении, на хроническое облучение, с экстраполяцией воздействия от внешнего облучения на внутреннее, с переходом от индивидуума к популяции и т.д.

В то время как первый подход к решению задач защиты биоты отталкивается от свойств биологических объектов, то во втором – от свойств источника. Пошаговое решение задачи оценки воздействия на биоту и защиты окружающей среды – наиболее прагматичный и логически завершенный подход к практическому применению системы защиты биоты. Этот подход позволяет осуществлять управление источниками выброса радионуклидов в окружающую среду, поскольку на первых своих двух этапах устанавливает общие для всех представителей биоты в разных видах экосистем дозовые пределы воздействия и контрольные уровни содержания радионуклидов в основных компонентах среды обитания живых организмов. При этом превышение контрольных уровней загрязнения в реальной ситуации не означает, что дозовые пределы биоты будут нарушены, поскольку они рассчитаны по самым консервативным входным параметрам. В случае превышения контрольных уровней проводится более детальное изучение радиологической обстановки в рассматриваемом регионе, уточняются все входные параметры и определяются новые региональные контрольные уровни содержания радионуклидов в окружающей среде. Очевидно, что такая простота достигается за счет избыточной консервативности дозовых оценок и скорее всего базируется на уверенности в том, что система защиты человека дает достаточный запас для защиты биоты. Между тем расчет по этой методологии показывает [4], что контрольные уровни загрязнения, по крайней мере для отдельных радионуклидов, сопоставимы с контрольными уров-

нями для обеспечения безопасности населения, выведенными из предела доз 1 мЗв в год. Например, для  $^{137}\text{Cs}$  контрольный уровень загрязнения для почвы по дозовому пределу для наземных животных составляет 840 Бк/кг или 6.8 Ки/км<sup>2</sup> для пахотного горизонта, что очень близко к контрольным уровням загрязнения почв для непревышения дозы на человека 1 мЗв в год [5].

Если принять, что в качестве операционных дозиметрических величин будут служить характеристики поля излучения источников в месте расположения биологического объекта, такие как мощность поглощенной дозы в ткани или керма, то они вместе с характеристиками источника (вид и энергия излучения) и характеристиками объекта дадут достаточно информации для перехода к радиобиологическим дозиметрическим характеристикам, которые для каждого объекта могут иметь разный набор. В этом случае построение системы защиты биоты следует начинать с определения сценариев загрязнения окружающей среды и образования поля излучения в месте обитания живых организмов.

При сценарном подходе многие свойства живых организмов становятся обычными входными параметрами дозиметрических моделей, а не уникальными свойствами рассматриваемых объектов. Кроме того, отталкиваясь от сценариев, анализ радиационной обстановки и воздействия на биоту, как и решение дозиметрических задач, можно разбить на два этапа. На первом этапе определяются поле излучения в месте нахождения объекта для оценки доз внешнего облучения и свойства источника для оценки доз внутреннего облучения. На втором этапе осуществляется переход к дозовым нагрузкам на объект.

Основные компоненты и показатели возможных сценариев облучения биоты в случае загрязнения окружающей среды показаны в таблице.

Не все показатели и комбинации показателей могут быть предметом рассмотрения при оценке воздействия радиоактивного загрязнения окружающей среды. Это один из вопросов, по которому необходимо прийти к согласию. Например, в таблице приведены четыре режима облучения, однако мало вероятно, что в системе защиты биоты будут рассматриваться неравновесные режимы облучения. Скорее всего будет принят к рассмотрению режим облучения с постоянной мощностью дозы. Этот режим облучения реализуется при разовом загрязнении окружающей среды долгоживущими радионуклидами, а также при постоянном поступлении короткоживущих радионуклидов. В первом случае геометрия источников может принимать различные формы, а во втором будет создаваться практически один тип источника – плоский.

Основные компоненты и показатели сценариев облучения биоты при загрязнении окружающей среды

Основные компоненты сценариев облучения биоты	Показатель и описание
Геометрия источника излучения	1. Точечный 2. Плоский 3. Толстый слой конечной толщины 4. Полубесконечный 5. Бесконечный 6. Распределенный по экспоненте в полубесконечной среде 7. Объемный ограниченных размеров
Тип излучения	1. $\alpha$ -излучение 2. $\beta$ -излучение 3. $\gamma$ -излучение 4. $\beta + \gamma$ -излучение
Режим облучения	1. С постоянной мощностью дозы 2. Прерывистый 3. Спадающая мощность дозы 4. Возрастающая мощность дозы
Расположение объекта	1. Внутри источника 2. Вне источника в той же среде 3. Вне источника в другой среде 4. Перемещение в средах
Геометрия объекта	1. Шар 2. Цилиндр 3. Эллипсоид 4. Параллелепипед

Сценарный подход к решению дозиметрических задач позволяет более обоснованно подойти к выбору критических видов живых организмов в загрязненных экосистемах, поскольку наряду с сопоставлением видов по радиочувствительности, мы можем провести сопоставление по величине получаемых дозовых нагрузок.

В отличие от человека для объектов биоты невозможно будет соблюсти близость значений операционных и нормируемых величин (опять же из-за разнообразия живого мира), поэтому для оценки воздействия излучений на биоту при загрязнении окружающей среды необходимо иметь набор дозиметрических моделей, способных определять характеристики поля излучения в месте обитания биологического вида и дозовые нагрузки на организм при внешнем и внутреннем облучении. С помощью этих моделей можно разработать производные от основных нормативов на содержание радионуклидов в окружающей среде и дозиметрические характеристики поля излучения. Для того чтобы этот набор не был бесконечно большим, можно использовать метод

“референтной фауны и флоры”, но, как сказано ранее, лучше использовать сценарный подход.

При разработке дозиметрических моделей одновременно должны быть прописаны три группы приближений: описывающие источник, закономерности прохождения излучения в среде и тканях объекта и характеристики объекта. Первая группа приближений составляет основную часть сценария радиологической ситуации на территории, загрязненной радионуклидами, и описывает геометрию источника и распределение в нем радионуклидов. Вторая группа приближений носит наиболее общий характер и в большей степени связана с учетом рассеянного излучения и особенностями прохождения излучения через гетерогенные среды. Третья группа приближений наиболее важная в любой модели. От того, насколько хорошо они описывают объект, его физические характеристики, поведение в природе, особенности роста и развития, радиобиологические характеристики и др., зависит точность оценок доз облучения животных или растений.

В зависимости от предназначения модели – для оценок доз внешнего облучения или доз внутрен-

него облучения – составы приближений в третьей группе значительно различаются. При разработке моделей объект должен быть описан таким образом, чтобы были учтены все его свойства, влияющие на функцию перехода от дозовых характеристик поля излучения или от характеристик источника к поглощенным дозам в критических органах. Это прежде всего геометрическая форма и размеры, а также местоположение относительно источника. Кроме этих параметров каждый вид обладает биологическими особенностями, которые необходимо учитывать при разработке моделей.

Наибольшее влияние на формирование дозовых нагрузок на растения оказывают такие свойства, как

- сезонность развития;
- прохождение фаз развития с разной радиочувствительностью;
- наличие многих критических органов и тканей;
- слабая защищенность чувствительных тканей.

Для растений в основном разрабатывают дозиметрические модели внешнего облучения. Из-за малых размеров критических органов и тканей внутреннее облучение оценивают только по  $\beta$ - и  $\alpha$ -излучению по простейшим моделям. Вклад в общую поглощенную дозу от внутренних источников в большинстве радиологических ситуаций незначительный.

Наибольшие трудности с построением дозиметрических моделей внешнего облучения связаны с учетом вклада  $\beta$ -излучения. Из-за слабой защищенности критических органов малочувствительными к облучению тканями он может превышать вклад от  $\gamma$ -излучения на порядок величины, а из-за слабой проникающей способности  $\beta$ -излучения не каждую среду из растений можно представить в виде гомогенной, поэтому же в моделях необходимо учитывать изменения в геометрии облучения критических органов в процессе роста и развития растений.

Для животных оценка доз облучения должна проводиться от внешних и внутренних источников. Наиболее важный фактор, влияющий на формирование доз внешнего облучения (помимо геометрических форм и размеров), – это поведение в природе для диких видов или режим содержания для сельскохозяйственных животных. Кроме того, необходимо знать, на какой стадии жизненного цикла находится изучаемый вид животных. При оценке доз внутреннего облучения большое значение имеют возраст животных, особенности в питании и усваивании пищи, которые влияют на поведение радионуклидов при поступлении внутрь организма.

Один из вопросов, который следует разрешить при оценке воздействия излучений на животных, заключается в корректности суммирования доз внешнего и внутреннего облучения. При анализе зависимостей доза–эффект для животных и растений чаще всего используют понятия поглощенная доза и мощность поглощенной дозы. С целью упрощения подходов к оценке воздействия радиации на биоту по умолчанию все авторы исследований приняли, что характеризовать эффекты воздействия лучше всего среднепоглощенной в теле живого организма мощностью поглощенной дозы, обходя тем самым вопрос о неравномерном распределении поглощенной энергии в организме. Между тем при внешнем облучении всего тела дозовая нагрузка на ткани вблизи поверхности тела животных выше, чем расположенные ближе к центру. Разница тем больше, чем больше масса животного и ниже энергия  $\gamma$ -квантов. Наибольшие дозы  $\gamma$ -излучения от внутренних источников создаются в центре животного. Если принять, что критическими являются кроветворные органы, то было бы более правильно суммарные дозы  $\gamma$ -излучения оценивать для тканей вблизи поверхности тела животных.

Одна из задач дозиметрии заключается в том, чтобы обеспечить исследователей инструментом для оценки радиационной обстановки и дозовых нагрузок на живые организмы. В качестве примера такого инструмента может быть продемонстрирована программа расчета коэффициентов дозового преобразования и оценки доз облучения животных, разработанная во ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агробиологии в рамках проекта МНТЦ 3003 “Радиационное воздействие российских предприятий ядерно-энергетического комплекса на окружающую среду и человека. Разработка научных основ радиационной защиты окружающей среды”.

Программа выполнена в виде исполнимого файла и включает в себя модули расчета коэффициентов дозового преобразования (КДП) внешнего и внутреннего облучения животных, а также модули расчета доз на сельскохозяйственных животных. Интерфейс выполнен на одной форме, имеющей две закладки: для расчета КДП и для расчета доз. Общий вид формы с закладкой для расчета КДП представлен на рис. 3.

Для обеих закладок в верхней части на форме содержатся общие элементы управления. С помощью списка “РАДИОНУКЛИДЫ” проводится выбор радионуклида. В левой части закладки “КДП животных” можно выбрать тип источника и характеристику геометрии облучения животных. Для исследования представлены три вида источника для

наземных животных и толстослойный источник для животных, либо находящихся внутри поч-

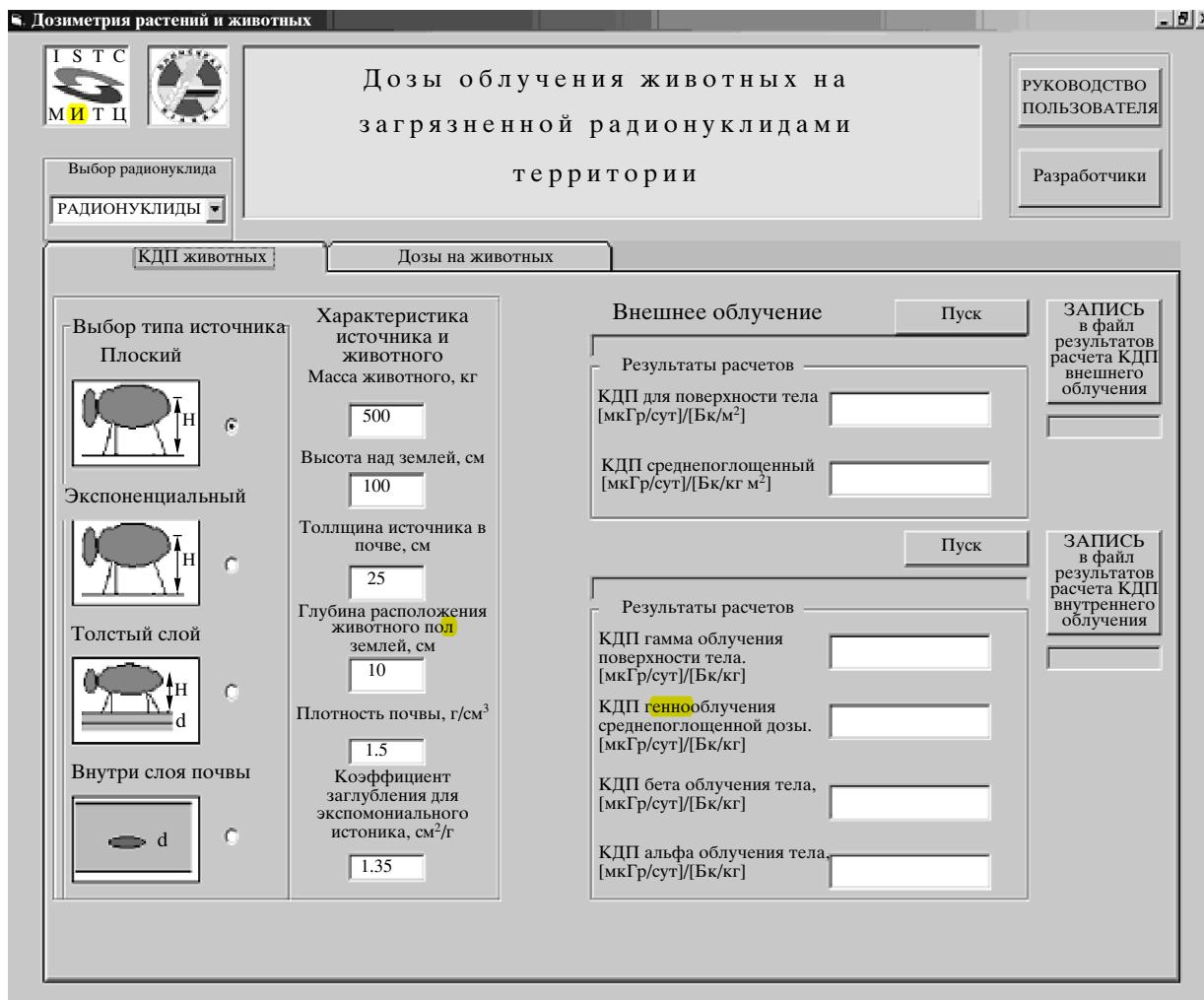


Рис. 3. Интерфейс программы расчета КДП для животных.

вы, либо проводящих там часть времени. Геометрия облучения и свойства источников могут изменяться пользователем. Можно задать или изменить массу животного, высоту расположения тела животного над землей, толщину слоя почвы с равномерно распределенными радионуклидами, глубину расположения животного под землей, плотность почвы и коэффициент заглубления для экспоненциального источника.

В правой части закладки содержатся командные кнопки для запуска расчетов КДП внешнего и внутреннего облучения, а также командные кнопки для переноса данных расчета КДП во внешний файл данных.

Общий вид закладки для расчета доз облучения сельскохозяйственных животных и мышевидных грызунов представлен на рис. 4.

На форме для расчета доз облучения содержатся элементы управления входными данными, командные кнопки и текстовые окна для вывода данных расчета доз внешнего и внутреннего об-

лучения. Кнопками можно выбрать тип фермы, в которой содержатся животные. Расчет доз внешнего облучения проводится отдельно для искусственных и естественных радионуклидов. Разница между ними состоит в том, что для искусственных радионуклидов источник в почве является экспоненциальным, а для естественных источник считается полубесконечным. Расчет может быть проведен для одного и того же радионуклида в обеих геометриях. После запуска команд на расчет доз внешнего облучения результаты для всех животных выдаются одновременно.

С помощью управляющих элементов либо с помощью бегунка, либо численным набором в отдельных окошках пользователь может задать долю времени, которую животное в течение суток проводит на ферме или, для мышевидных грызунов, в норе.

При расчете доз внутреннего облучения пользователю необходимо ввести данные о суточном поступлении и коэффициенте перехода радио-

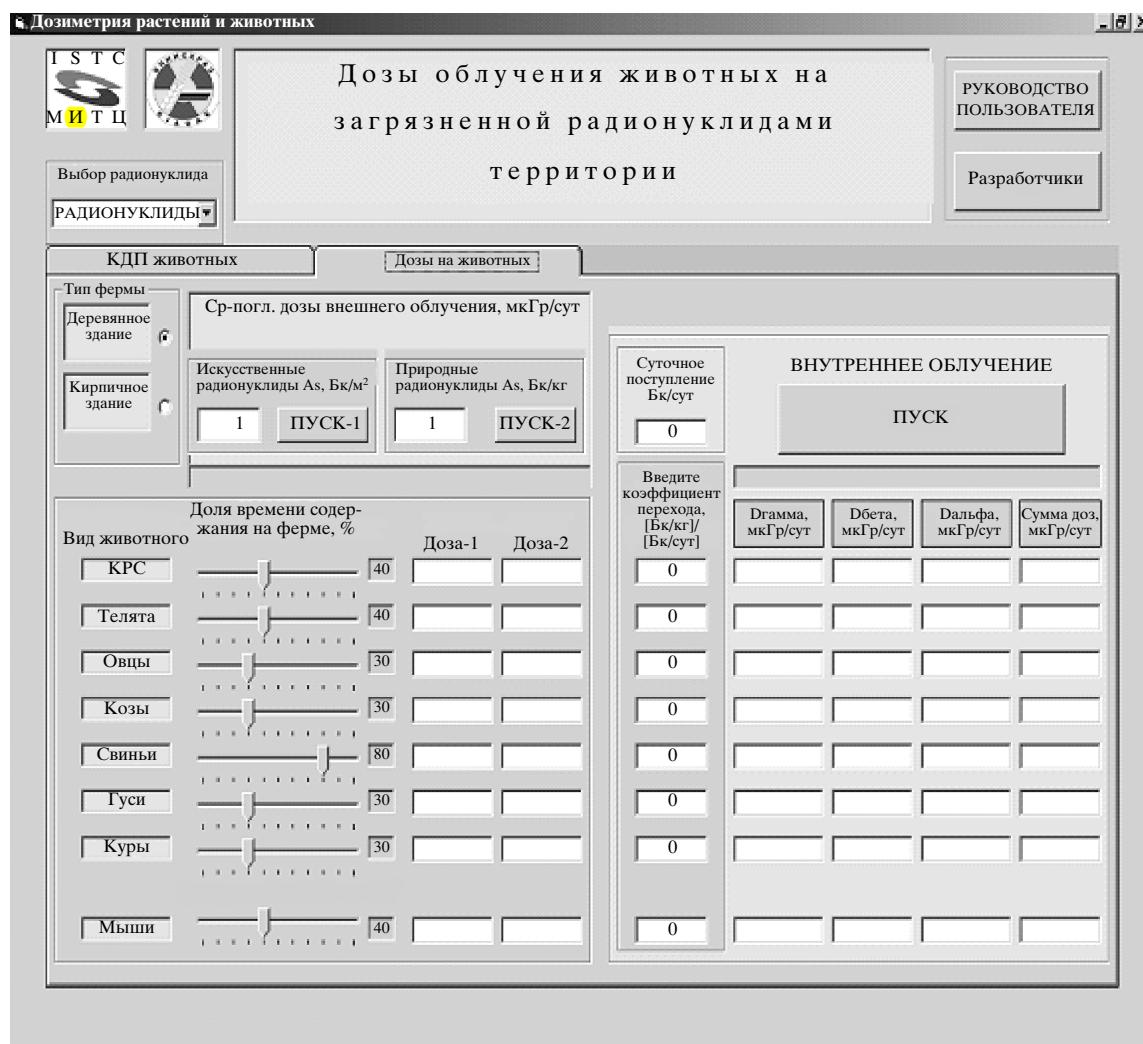


Рис. 4. Общий вид интерфейса для расчета доз облучения сельскохозяйственных животных.

нуклида в тело животного. После ввода данных программу можно запустить и рассчитать среднепоглощенные дозы  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ -излучений и сумму по всем видам излучений.

В настоящее время разработано несколько программ расчета коэффициентов дозового преобразования и доз облучения биоты, такие как RESRAD [6], DOSES3D [7], EDEN 2 [8] и др. Несмотря на то что эти программы были разработаны под свои методологии, все используют сценарийный подход, когда пользователь задает свойства источника, параметры среды прохождения излучения и свойства объекта. Различие программ состоит в методах расчета доз и в параметрах, заданных "по умолчанию". Обзор и сопоставление данных [9] показал большую вариабельность результатов расчета по разным программам. Скорее всего это связано с различиями во входных параметрах, например таких, как состав излучения дочерних продуктов распада цепочек урано-

вого ряда, а также с различиями в геометриях источника и объекта.

Анализ литературы и научных исследований показывает, что до настоящего времени главная проблема экологической дозиметрии – адекватное отображение связи биологических эффектов от воздействия ионизирующих излучений с закономерностями формирования дозовых нагрузок на различные виды живых организмов. Пока исследования формирования доз на биоту идут по пути значительных упрощений радиологических ситуаций. Рассматриваются только равновесные процессы образования источников излучения, дозы рассчитываются в основном на все тело при условии равномерного распределения радионуклидов, не учитываются ростовые процессы и биологические особенности организмов и т.д. Остается еще не решенным вопрос об учете качества излучения. Тем не менее то, что решение вопросов экологической дозиметрии поставлено в

практическую плоскость, позволит прийти к согласованным подходам защиты окружающей среды по отношению ко всем живым организмам, а не только к человеку.

Работа выполнена при поддержке проекта МНТЦ 3003 “Радиационное воздействие российских предприятий ядерно-энергетического комплекса на окружающую среду и человека. Разработка научных основ радиационной защиты окружающей среды”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. European Commission Council decision of 3 June 2002 concerning the sixth framework programme of the European Atomic Community (Euroatom) for nuclear research and training activities, also contributing to the creation of the European Research Area (2002–2006) // Official J. European Communities 2002, 2002/668/Euratom, L232, 229.238.2002.
2. U.S. DOE. A graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota/Technical Standard DOE-STD-1153 – 2002; U.S. Washington, DC: Department of Energy, 2002.
3. Garnier-Laplace J., Gilek M., Sundell-Bergman S., Larsson C.-M. // J. Radiol. Prot. 2004. V. 24. P. A139–A155.
4. Higley K.A., Domotor S.L., Antonio E.J., Kocher D.C. // J. Environ. Radioactivity. 2003. V. 66. P. 41–59.
5. Спирин Е.В., Куринов А.Д. // Почвоведение. 1995. № 9. С. 1–7.
6. DOE (2004). ISCORS – RESRAD-BIOTA User's Guide, version 1. A Tool for Implementing a Graded Approach to Biota Dose Evaluation / Technical Report 2004-02, US DOE/EH-0676.
7. EPIC (2003) (Environmental Protection from Ionising Contaminants) / Eds J. Brown, H. Thorring, F. Hosseini. Report ICA2-CT-2000-100032, Norway.
8. Beaugelin-Seiler K., Jasserand F., Garnier-Laplace J., Garriel J.C. // Health Phys. 2006. V. 90. P. 485–493.
9. Vives I., Battie J., Balonov M., Beaugelin-Seiller K. et al. // Radiat. Environ. Biophys. 2007. V. 46. P. 349–373.

Поступила в редакцию  
12.09.2008

## Actual Problems of Ecological Dosimetry

E. V. Spirin

Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Russian Academy of Agricultural Sciences,  
Obninsk, 249032 Russia; e-mail: spirin@rias.obninsk.org

Different methodological approaches are analyzed for developing the environmental protection system with respect to biota, as well as the state-of-the-art of dosimetric studies on the assessment of radiological consequences on biota in the contaminated environment. Factors are enumerated that the influence quality of dosimetric models. The need for consideration of radiobiological and biological peculiarities of organisms in dosimetric models is stressed.