

**Б. С. Пристер, Е. К. Гаргер, Н. Н. Талерко, В. Д. Виноградская, Т. Д. Лев**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12,  
корпус 106, Киев, 03028, Украина*

## **РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ И МОДЕЛЬ ТЕРРИТОРИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МОНИТОИНГА АГРОСФЕРЫ ПОСЛЕ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АЭС**

Для повышения эффективности защиты населения и сельскохозяйственного производства от последствий тяжелой аварии предложено превентивно, до аварии, проводить сбор и анализ картографической, статистической, экологической и другой информации, необходимой для прогнозирования и оценки радиационной обстановки. Разработана методология радиоэкологического районирования территории, загрязненной радиоактивными выпадениями с использованием ландшафтно-бассейнового принципа и ГИС-технологий. Разработана модель территории, таксономическими единицами которой являются элементы ландшафта или объекты сельскохозяйственного землепользования, позволяющая согласовать пространственно-временное распределение характеристик и совместить модели атмосферного распространения и миграции радионуклидов по цепи «почва – растения – животные – продукция – человек». Для прогнозирования радиационной обстановки на следе аварийного выброса использованы разработанные авторами модели атмосферного переноса радионуклидов, аэрального и корневого загрязнения растений.

*Ключевые слова:* тяжелые аварии, радиоэкологическая модель территории, районирование территории, прогнозирование радиационной обстановки.

### **Вступление**

Анализ тяжелых аварий в атомной промышленности и энергетике показывает, что основной их причиной является человеческий фактор и исключить их вероятность практически невозможно [1]. При тяжелых авариях на АЭС продукция сельского хозяйства вносит значительный вклад в дозу облучения человека, поэтому оно является приоритетным объектом реагирования. Дозы облучения населения на загрязненной территории формируются очень быстро. В то же время период накопления необходимой для оценки радиационной обстановки информации и согласования значительно превосходит время, за которое формируется основная часть дозы облучения населения и когда может быть достигнута наибольшая эффективность контрмер. Площадь загрязненной территории значительно превосходит размеры зоны наблюдения АЭС, поэтому картографическая, статистическая и другая информация о радиоэкологических характеристиках территории к моменту аварии не собрана.

Опыт Кыштымской, Чернобыльской и Фукусимской аварий показывает, что оценка состояния отдельных сред планируется и реализуется без согласования и координации. Как следствие, картографические сетки, масштабы и интегральные результаты трудно совместить в пространстве и времени, значительно увеличивается неопределенность оценок и планирования контрмер на загрязненных территориях. Для повышения эффективности реагирования на аварию предложено сбор и подготовку картографической, статистической, радиоэкологической и другой информации, необходимой для оценки обстановки и принятия решений, проводить превентивно, до аварии. Важно обеспечить согласование пространственно-временного распределения характеристик для совмещения моделей атмосферного распространения и миграции радионуклидов (РН) по цепи «почва – растения – животные – продукция – человек» и дозиметрических моделей. Входящие в уравнения миграции параметры в виде коэффициентов и постоянных должны быть оценены для выделенных элементов ландшафта контролируемой территории и введены в базы данных (БД).

Конечная задача такого подхода – выявить элементы территории и объекты, потенциально опасные с точки зрения возможности производства продукции с превышением норматива на содержание РН. Это позволит в короткие сроки после аварии ответить на основные вопросы – где, когда, какие контрмеры необходимо применить для каждого ландшафтного комплекса. Для решения поставленных задач разработаны концепция и алгоритм превентивной подготовки информации и радиоэкологическая модель территории (РМТ).

### **Материал и методы исследования**

В качестве полигона для отработки РМТ мы выбрали часть территории Украины, на которой размещены Чернобыльская (ЧАЭС) и Ровенская (РАЭС) электростанции. Мощность и высота выброса радиоактивных веществ при аварии на ЧАЭС привели к загрязнению только в Украине территории

© Б. С. Пристер, Е. К. Гаргер, Н. Н. Талерко, В. Д. Виноградская, Т. Д. Лев, 2015

53454 км<sup>2</sup> с уровнем загрязнения выше 16,5 кБк·м<sup>-2</sup> <sup>137</sup>Cs с населением 2,291 млн человек, проживающих в 2293 населенных пунктах [2, 3]. Отличительной чертой загрязненной территории при аварии на ЧАЭС стало многообразие ландшафтно-экологических условий. Западный радиоактивный след пересек бассейн р. Припять, который включает бассейны притоков рек Днепр и Припять 2 - 4-го порядков, представленных разными типами почв (рис. 1).

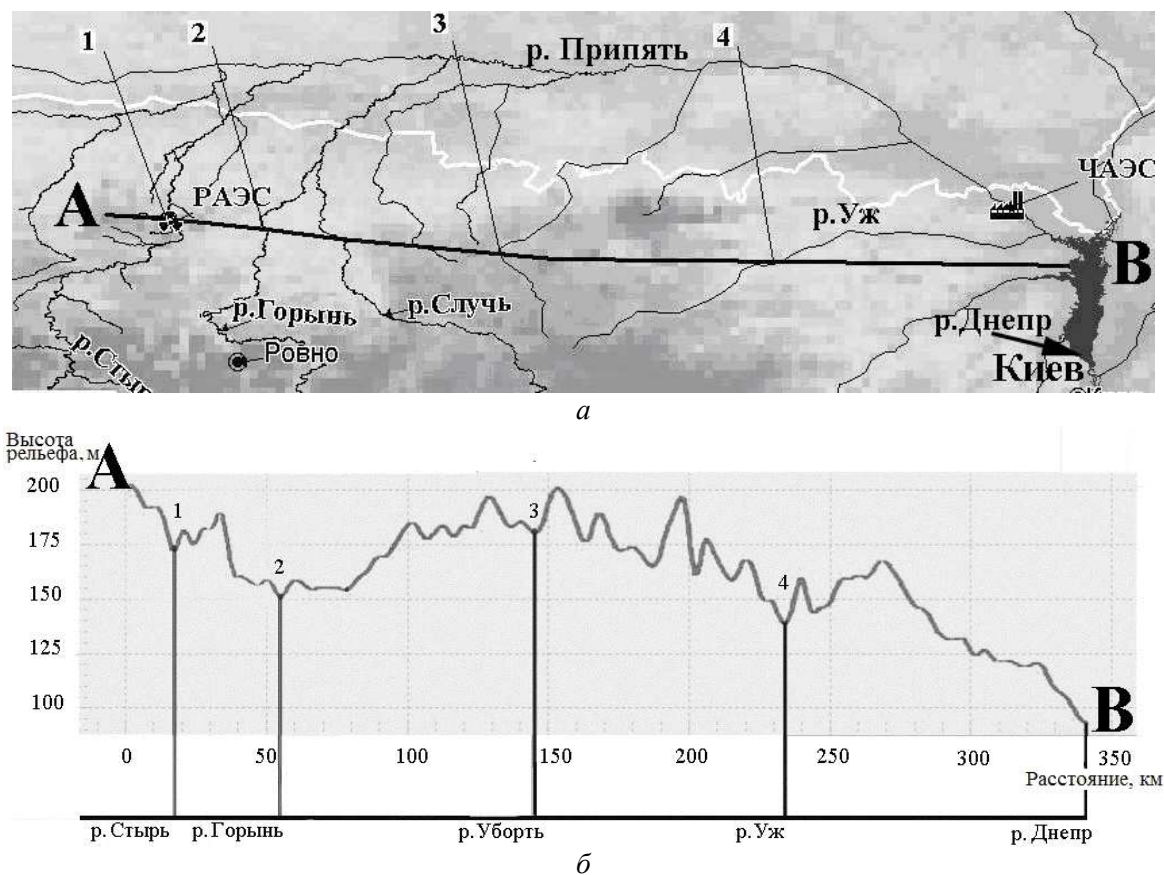


Рис. 1. Сечение рельефа по направлению от РАЭС к ЧАЭС в пределах бассейна р. Припять (а) и профиль этого сечения (б).

Это обусловило чередование однотипных элементов ландшафта и почв вдоль направления следа. В этом случае две соседние малоудаленные точки мониторинга могут принадлежать к разным бассейнам и элементам ландшафта, что должна учитывать система мониторинга. Основным методом превентивной оценки радиационной обстановки на следе аварийного выброса выбран метод моделирования с использованием ГИС-технологий.

## Результаты исследований

### Результаты исследований 1986 – 2004 гг.

Результаты контроля концентрации <sup>137</sup>Cs в молоке коров на территории следа от аварии на ЧАЭС показали, что она изменялась в пределах двух порядков величин и характеризовалась очень неоднородным пространственным распределением и отсутствием уменьшения концентрации от эпицентра к периферии следа [3]. Максимальные концентрации <sup>137</sup>Cs в молоке коров наблюдали в хозяйствах Ровенской и Волынской областей на удалении 300 км и более, где основным кормом для коров были сено и зеленая масса природных и сеяных трав, выращиваемых на торфяных заболоченных и осушенных органогенных почвах. Основным продуктом, создающим дозу облучения для человека, на протяжении всего периода после аварии было и остается молоко коров [4].

Для стандартизации и унификации оценок доз, поглощенных жителями населенных пунктов, на всей загрязненной территории Украины реализована большая программа общегосударственной дозиметрической паспортизации, в которой приняли участие многие научные организации, местные органы власти, санитарно-эпидемиологические лаборатории. Оценка доз проведена Научным центром радиационной медицины АМН Украины. Дозу внешнего облучения рассчитывали по средней

плотности загрязнения территории населенного пункта  $^{137}\text{Cs}$ , дозу внутреннего облучения - по данным измерения содержания  $^{137}\text{Cs}$  не менее чем в 10 пробах молока и 10 пробах картофеля в каждом пункте [4].

Величина дозы внутреннего облучения  $D_{\text{int}}$  в населенных пунктах в непосредственной близости от источника выброса была ниже по сравнению с удаленными более чем на 300 км вдоль оси западного следа от ЧАЭС до границы с Польшей. Объяснение этому дают данные измерений коэффициентов пропорциональности между концентрацией  $^{137}\text{Cs}$  в молоке и плотностью загрязнения торфяных и кислых минеральных почв под лесом. Они составляли  $2,5 - 5,4 \text{ Бк}\cdot\text{л}^{-1}/\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$  (Ровенская и Волынская области), что на порядок величин больше значений для агроландшафтов на дерново-подзолистых почвах Киевской и Черниговской областей -  $0,24 \text{ Бк}\cdot\text{л}^{-1}/\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$  [5].

На торфяных и кислых почвах содержание  $^{137}\text{Cs}$  в молоке превышало норматив при низкой плотности загрязнения  $0,5 - 1,1 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ . Очевидно, такие ландшафты могут быть названы критическими, определяющими радиационную обстановку. Недооценка роли критических ландшафтов в формировании  $D_{\text{int}}$  привела к тому, что контрмеры в Волынской и Ровенской областях стали проводиться только с 1988 г. В то же время даже через 30 лет после аварии на ЧАЭС содержание  $^{137}\text{Cs}$  в молоке примерно в 30 населенных пунктах зоны избыточного увлажнения Полесья достигает  $400 - 600 \text{ Бк}\cdot\text{л}^{-1}$ .

Приведенные факты показывают необходимость учета таких характеристик, как тип ландшафта и почвы, в формировании и пространственном распределении дозы  $D_{\text{int}}$  и разработке методов интеграции этих характеристик.

### Роль ландшафта в формировании радиационной обстановки

В результате многолетнего мониторинга растениеводства после аварии на ЧАЭС сформулированы основные закономерности миграции радионуклидов в системе «почва – растение». Разработана модель, которая описывает временной ход накопления РН растениями и зависимость коэффициента перехода в растения  $TF$  от свойств почвы и особенностей растений [6].

В первый год после аварии концентрация РН в растениях обусловлена преимущественно аэральным путем поступления. В табл. 1 представлены значения коэффициентов перехода  $TF(t = 0)$  на 1986 г., которые получены экстраполяцией тренда за весь период наблюдений. Концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в растительной продукции может изменяться от 10 до 30 раз для одной культуры на разных почвах, для разных культур на почве одного типа до 15 - 33 раз при равной плотности выпадений.  $D_{\text{int}}$  в значительной мере определяется составом рациона и размещением культур на территории. Обращают внимание очень высокие значения  $TF$  для трав из природных ландшафтов: они в 2,2 – 5,0 раз выше, чем для сеяных трав.

Таблица 1. Значения усредненных по группам культур экстраполированных на момент выпадения коэффициентов перехода  $^{137}\text{Cs}$   $TF(0)$ ,  $\text{кг}^{-1}\cdot\text{м}^2 \cdot 10^{-3}$  ( $\pm 25\%$ ) [6]

Группа культур	Тип почвы			
	Торфяно-болотная	Дерново-подзолистая	Серая лесная	Чернозем
Естественные травы	223	29	10	-
Сеяные злаковые травы	95	5,8	4,9	3,3
Кормовые: клевер, люцерна, кукуруза	39	3,8	1,9	1,7
Овощные: капуста, томат, огурец	-	2,9	2,0	1,2
Клубни, корнеплоды: лук, свекла, картофель	10	1,6	0,63	0,60
Зерновые: озимая пшеница, ячмень, рожь	7,3	0,89	0,66	0,36
Кратность различий	31	38	20	16

Был разработан и запатентован метод комплексной оценки агрохимических свойств почвы – комплексная оценка свойств почвы (КОСП) или  $Sef$  [7]. КОСП основана на представлении почвы в виде трехфазной системы, основными характеристиками которой являются рН почвенного раствора (жидкая фаза), содержание органического вещества (ОВ) и сумма поглощенных оснований (СПО). Установлена количественная связь параметров разработанной кинетической модели поведения ради-

онуклидов в системе «почва - растение» ТФ и скоростей сорбции-десорбции с Sef.

Динамика поведения РН в цепи «почва – растение» определяет динамику РН в молоке и мясе животных, причем важная роль ландшафта проявляется и в цепи «корм – продукты животноводства». Так, концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в молоке от стада коров предприятия «Хлебороб» с. Миляч Дубровицкого района Ровенской области, как и в траве, снижается во времени по экспоненте. Однако ежегодно наблюдается значительный (до трех раз) подъем концентрации нуклида в молоке в период перевода животных со стойлового содержания на пастбище, где зеленая масса природных трав составляет около 90 % их рациона [5].

Очевидно, при районировании территории для создания РМТ основные характеристики территории – место в ландшафте, тип ландшафта, степень увлажнения почвы и ее свойства – должны быть дискретно оценены отнесением к одному из типов в соответствии с классификацией. Использование Sef позволяет количественно учесть свойства почвы в накоплении РН растениями. В этом случае для каждого элемента территории следует внести в БД значения агрохимических свойств почвы рН, СПО и ОВ или комплексную оценку свойств Sef.

Ландшафты (леса, природные лугово-пастбищные угодья, севообороты), продукция из которых при одинаковых значениях плотности радиоактивного загрязнения характеризуется существенно более высокими коэффициентами перехода РН из почвы в растительность ТФ, и, как следствие, более высокой концентрацией РН в продукции по сравнению с другими с такой же плотностью загрязнения почвы, мы называем *потенциально критическими*. Критическими могут быть также типы почвы, виды растений и животных. Радиоэкологические характеристики элементарных ландшафтов в значительной мере определяются их местом в бассейне, которое определяет тип почвы и системы землепользования, адаптированной к экологическим условиям. Ярким примером являются пойменные ландшафты, которые, как правило, используются для выпаса коров и заготовки сена.

На примере бассейна р. Горбах показано, что вклад в  $D_{\text{ин}}$  населения при равной плотности загрязнения территории в среднем составляет: пойменные ландшафты на критических торфяно-болотных, дерновых и луговых типах почвы с луговой и пастбищной растительностью - около 80 %; склоновые элементы с частично увлажненными и оглееными типами минеральных почв – в пределах 5 - 15 %; водораздельные части - до 5 %.

Для исследованной территории прогноз и мониторинг должны приоритетно проводиться на территориях, на которых формируется большая часть дозы облучения человека, в случае Украинского Полесья - на пойме, представленной торфяными переувлажненными почвами.

Плотность загрязнения почвы не может быть единственным критерием опасности радиационной обстановки: ведущую роль играют тип ландшафта, тип почвы и место ее в ландшафте, система землепользования, способ содержания животных, и другие факторы. Влияние этих особенностей проявляется на всех трофических уровнях, поэтому необходим универсальный принцип деления территории.

### Ландшафтно-бассейновый принцип районирования территории

Впервые радиоэкологическое районирование территории мы применили при разработке системы мониторинга зоны наблюдения ЧАЭС в 1984 – 1986 гг. [8, 9]. В основу был положен ландшафтно-бассейновый принцип, при котором бассейн рассматривается как устойчивая геосистема, объединяющая выстроенные в четкой иерархии в соответствии с порядком водосборов внутри бассейна системообразующими потоками вещества [10]. Бассейн является первичной, объективно существующей структурной единицей территории, характеристиками которой служат тип почвы, тип ландшафта и тип подстилающей поверхности. Эти три экологических фактора, которые позволяют учесть влияние ландшафтно-геохимических условий местности на процессы осаждения РН на подстилающую поверхность и на растения, миграцию их в системе «почва - растение» и формирование дозы облучения населения при поступлении РН в организм животных и человека.

Использование топографических карт разного масштаба позволяет объединять бассейны на одной картографической основе. На всех уровнях масштаба соблюдается кодификация бассейнов и экологических характеристик в порядке соподчинения ландшафтов. Выбор природных факторов, определяющих экологические характеристики территории, базируется на анализе материалов комплексных тематических карт, где дифференцированно показаны особенности рельефа, использования земли (*landuse*) и тип ландшафта (*landscape*), тип преобладающей почвы (*SoilGroup*) и растительности, в рамках бассейна. При анализе и выборе приоритетов также учитываются плотность населения в рамках бассейна (*population density*) и перепад высот местности в рамках бассейна (*elevation*).

Для радиоэкологического районирования использованы разные пространственные масштабы (государственный уровень М 1:3500000, региональный уровень М 1:200000, локальный уровень М 1:100000/10000), что позволяет детализировать и увеличивать число участвующих экологических факторов. Общая система координат позволяет также объединить на одной картографической основе все 3 уровня масштаба.

Рассмотрим основные принципы районирования на примере полигона. Выделение границ бассейнов водотоков проводится по максимальным значениям высоты рельефа относительно выбранного водотока. В пределах водосборного бассейна выделяют элементарные ландшафты. Для комплексного радиоэкологического районирования территории целесообразно использовать геохимическую классификацию элементарных ландшафтов М. А. Глазовской [10], в основу которой положена сопряженность групп элементарных ландшафтов по стоку. Каждый из типов элементарных ландшафтов характеризуется определенным местоположением в бассейне, условиями увлажнения, типом почвы и растительным покровом. В табл. 2 приведена краткая характеристика основных типов элементарных ландшафтов полигона РАЭС – ЧАЭС.

Таблица 2. Характеристики основных типов элементарных ландшафтов полигона

Тип элементарного ландшафта	Местоположение в бассейне	Условия увлажнения	Типы почв	Растительный покров	Главные миграционные процессы
Элювиальный	водоразделы, надпойменные террасы	суходолы нормальные с глубоким залеганием подпочвенных вод	дерново-подзолистые, дерновые песчаные и супесчаные, черноземы оподзоленные, светло-серые лесные	лес, полевые культуры	поверхностный смыв (вынос)
Транс-элювиальный, направленный по стоку	склоны	коротко затопляемые луга избыточного увлажнения средне затопляемые влажные поймы	дерново-подзолистые, дерновые суглинистые дерновые оглеенные, темно-серые, торфяно-глеевые	полевые культуры полевые культуры, луговая, пастбищная растительность	транзит
Супер-аквальный, наиболее низкое местоположения	низкие террасы и поймы	затопляемые низкие поймы	элювиально-луговые, дерновые оглеенные, торфяно-болотные	луговая, пастбищная растительность	аккумуляция

Выделенные элементы территории являются структурными единицами радиоэкологического районирования, в пределах которых при радиоактивном загрязнении определенным нуклидом радиационная обстановка может быть оценена в соответствии с их радиоэкологическими характеристиками. Районирование проводится последовательно на государственном, региональном и локальном уровнях масштаба с разной степенью детализации признаков.

На 1-м этапе районирования создаем карты бассейнов, рельефа тестируемой территории с характеристикой склонов на основе данных SRTM Ver. 4.1, карты Grid с шагом сетки 2 × 2 км геодезической системы координат проекции Пулково, 1942. Делим территорию на элементарные радиоэкологические единицы. На локальном масштабе шаг сетки изменяют до 0,25 × 0,25 км.

На 2-м этапе создаем тематические картографические слои - реки, населенные пункты и т.п. Создаются карты почв, агрохимических свойств (или карты Sef), типов подстилающей поверхности (включает показатели землепользование, растительный покров, «параметр шероховатости»). Базовой картой является «Карта параметра шероховатости для 4-х времен года и рельефа» для ячеек регулярной сетки 2 × 2 км, покрывающей тестовую территорию РАЭС - ЧАЭС. Затем выполняется группировка и классификация признаков, устанавливается иерархия по радиоэкологической критичности.

3-й этап - создание базовой карты путем пересечения с слоем Grid. Проводят редактирование (экспертизу) комплексного покрытия - проверку вероятности существования выделенных комбинаций слоев; уточнение и корректирование с привлечением дополнительной информации.

4-й этап - выделение районов и создание карты районирования. Районам присваивают ком-

плексные коды в последовательности: код бассейна, код элемента ландшафта, код почвы, код культуры. Для прогноза радиационной обстановки необходимы классификаторы объектов.

Контуры тематических объектов (районов), выделяемых в различных информационных слоях, могут не совпадать в пространстве, согласование их границ выполняют на стадии редактирования карт. При создании модели применяется сеточный подход. Сетка Grid соответствует требованиям модели по всем информационным компонентам с учетом масштаба решаемых задач. Это обеспечивает согласованность входных и выходных параметров, универсальность модели по единицам измерений, по пространству, по времени и т.д. Комплексная радиоэкологическая карта для конкретной аварии строится из сценарных карт (сценарных по сезонам и т.п.) отдельных информационных слоев. Районирование предусматривает присвоение территориальным объектам радиоэкологических параметров и создание баз данных параметров по комплексным кодам, таких как параметры шероховатости подстилающей поверхности, коэффициенты пропорциональности и периоды полупотерь для аэрального загрязнения, коэффициенты перехода радионуклидов из почвы в растения и т.п. Степень детализации и группировка признаков должны быть выбраны оптимально, так как учет всего многообразия типов и отличий почвы, представленных в картографических материалах различного масштаба, в Украине, как и в других странах, очень трудоемкий и длительный процесс и его следует свести к выделению основных групп почв. Данные табл. 1 показывают, что размах величин  $TF$  и  $Sef$  в интервале минеральных почв составляет 3-4 раза. На общегосударственном и региональном уровнях тип почвы оценивается качественно в виде топологического названия группы почв, которые содержатся в легенде почвенных карт.

Для полигона все типы почв на общегосударственном (М 1:1430000) и региональном (М 1:200000) уровнях (61 для М1:1300000) объединены в 6 групп, которые согласованы с современной системой классификации почв ФАО/WRB: Podzoluvisols, Greyzems, Chernozems, Histosols, Gleysols, Fluvisols [11]. Мы рекомендуем при районировании территории придерживаться такого подхода.

Параметры “тип землепользования” и “наиболее распространенный вид растительности” логично сгруппированы для полигона на общегосударственном уровне в 5, региональном в 7 и локальном в 10 групп. Оперативно уточнить приоритетные объекты прогноза и мониторинга и вынести информацию на местность помогают космические снимки. Для выделенных районов значения плотности выпадений радионуклидов, комплексную оценку свойств почвы, дозы облучения человека и других характеристик определяем проведением прогнозных расчетов или путем мониторинга для точек с координатами  $X_i$  и  $Y_i$ . Эти значения распространяем на площадь ячейки сетки карты покрытия.

Название группы почв содержит только название типа почвы без детализации свойств, которые напрямую не используются для численного прогноза. Предложено проводить экспертную оценку степени критичности выделенных групп почв. В случае Полесского полигона, характеризующегося значительной пестротой почвенного покрова, мы применили шкалу из 7 разностей, которым в легенде карты присваивается номер от 01 до 07 в порядке убывания их критичности, который представляет собой оценку критичности в баллах. Диапазон значений критичности определяется в зависимости от необходимой точности оценки концентрации РН в продуктах и набора контрмер. Особое внимание должно быть сосредоточено на объектах, которые являются комплексами различных типов почвы. Например, в случае полигона установлено, что наиболее «критическими» при формировании радиационной ситуации на территории полигона будут органические торфяно-болотистые почвы; все грунтовые комплексы, включающие этот тип, необходимо детально проанализировать. Даже при малом вкладе критических почв в суммарную площадь на уровне государственного масштаба, на уровнях регионального и, особенно, локального масштабов роль критической компоненты может оказаться значимой, а то и определяющей.

К группе высокой критичности отнесены также комплексы дерново-подзолистых почв с дерновыми почвами, на которых возможно размещение «критических» пастбищных угодий. К каждому из названий группы почв приписан номер (бал критичности) типа почвы в легенде карты. Выделенные названия групп почв приведены в соответствии с названием почв по номенклатуре ФАО - ЮНЕСКО (1997) [11], что дает возможность адаптировать методологию к территориям за пределами Украины. Всего на территории полигона площадью более 1500 км<sup>2</sup> выделено около 250 районов, что следует признать приемлемым для проведения мониторинга.

#### **Оценка степени критичности выделенных районов**

Радиационная обстановка на территории, потенциальной в случае аварии, исследуется последовательным наложением гипотетических радиоактивных следов, рассчитанных по различным сце-

нариям аварий, на тематические карты разных информационных слоев (ландшафт, почва, растения, районы и т.п.) и карту комплексного районирования. Все информационные слои переводят в форму электронных карт, находят их суперпозицию, которая характеризует потенциальную опасность загрязнения районов. Мы получаем возможность не после аварии, но задолго до нее построить карты формирования доз в случае загрязнения территории при реализации разных сценариев тяжелых аварий.

Районы и элементы территории, продукция из которых при равной плотности выпадений будет наиболее загрязненной, являются потенциально критическими и это определяет приоритетность и объем мониторинговых исследований. Для оценки степени критичности выделенных районов предложено использовать метод экспертных оценок с группировкой параметров и учетом весовых коэффициентов, расчет которых проводится после ранжирования факторов в порядке приоритетности: вид землепользования, тип почвы, вид культуры.

#### **Прогноз пространственного распределения радиоактивных выпадений и загрязнения растений**

**Для прогноза пространственного распределения выпадений**  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  разработана мезомасштабная лагранжево-эйлерова модель LEDI [12], которая учитывает нестационарность источника выбросов и метеоусловий, неоднородность подстилающей поверхности. Модель рассчитывает объемную концентрацию РН в воздухе, плотность их выпадений, дозы внешнего облучения и внутреннего облучения за счет ингаляции РН. Результаты расчетов могут быть представлены в узлах регулярной сетки и по площади в пределах выделенных участков (населенные пункты, территории сельскохозяйственного производства, водоемы и др.). Это позволяет объединить их с экологическими моделями, которые рассчитывают последующую миграцию РН по пищевым цепям в рамках используемого ландшафтного подхода. Модель использует модель погоды WRF и превентивно подготовленные карты шероховатости почвенно-растительного покрова, влияющей на скорость осаждения аэрозоля. С помощью данной модели успешно реконструирована динамика формирования полей радиоактивного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}$  +  $^{132}\text{I}$  и  $^{133}\text{I}$  в Украине, Беларуси и России после Чернобыльской аварии.

**Прогноз аэрального загрязнения растительности.** Для прогноза внекорневого загрязнения растительности  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  наиболее часто используют модели, основанные на обобщении литературных данных о различных стадиях этого процесса [13]. Мы использовали экспериментально обоснованную нами модель AeralPlant [14]. Величина задерживания РН из выпадений (% от выпавшего на единицу площади количества) пропорциональна запасу биомассы в момент выпадений, который определяется в данный момент времени ландшафтными условиями, поэтому концентрация РН в биомассе при этом не меняется. Модель адекватно описывает быстрое самоочищение биомассы растений, что подтверждает правильность рекомендаций о запрещении выпаса и потребления молока на протяжении первых 7 – 10 сут после выпадений. Эти закономерности относятся и к загрязнению продукции зеленых овощей. Для прогноза аэрального загрязнения товарной части сельскохозяйственной продукции (зерно, плоды овощей, корнеплоды, клубни) и оценки радиоэкологической критичности в БД вводится вид сельскохозяйственной культуры с соответствующим коэффициентом пропорциональности КП. Величина КП для продуктивных органов определяется метаболическими процессами в растении и сильно зависит от химических свойств РН и фазы развития растений в момент выпадений. Модель хорошо описывает динамику аэрального загрязнения растений при авариях на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1» [18].

Прогноз внекорневого загрязнения растений выполняется путем пересечения следа от выброса по конкретному сценарию с картой слоя «землепользование», на которой указано расположение сенокосов, выпасов, зеленых кормов для животных и овощей (салаты, шпинат, зеленные культуры). Для унификации сценариев аэрального загрязнения растительности по литературным источникам проанализированы сроки прохождения фенологических фаз основными культурами, которые ведут отсчет от начала года.

На этапе превентивной подготовки составляют, периодически обновляют и вводят в БД карты размещения пастбищ и сенокосов, овощных культур, космические снимки. Для каждого сценария выброса выделяют критические по аэральному загрязнению ландшафты как приоритеты уточнения прогноза и контрмер быстрого реагирования для вероятных реализаций аварийных ситуаций, что позволяет соблюсти приоритет в проведении прогноза, мониторинга и контроля обстановки. Прогноз аэрального загрязнения продукции по пространству (агроландшафт, луговые травы, травы в лесу) и

по населенным пунктам (продукция, выращиваемая на огородах в населенном пункте) сделан с использованием осредненных данных по осаждению радионуклидов по зонам загрязнения и по видам групп почв в рамках бассейнов рек (рис. 2). Сравнение рассчитанного предела с фактическим уровнем позволяет безотлагательно принять решение о необходимости проведения контрмер. Алгоритм проведения оценки аэрального загрязнения растительности включает в себя проведение зонирования по результатам прогноза загрязнения тестовой территории в соответствии с значениями допустимых уровней вмешательства ДУВ1-ДУВ3 по мощности внешней дозы ( $\text{мкЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$ ) в результате аварийного выброса [15].

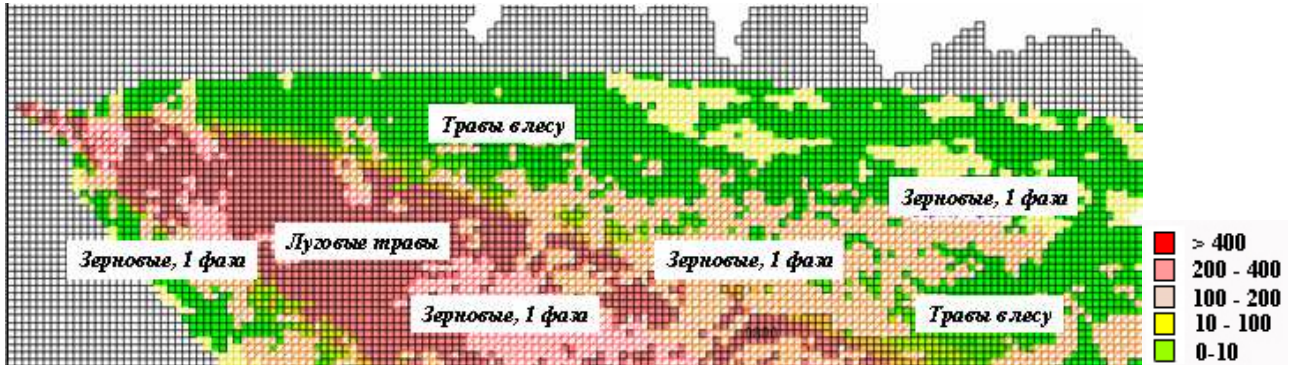


Рис. 2. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственной продукции (аэральное загрязнение) по пространству вследствие гипотетического выброса на РАЭС,  $\text{кБк}\cdot\text{кг}^{-1}$

**Прогноз корневого поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растения.** Используется кинетическая модель (SoilPlant), отличающаяся комплексной оценкой агрохимических свойств почвы  $\text{Sef}$  и аналитическим описанием зависимости  $\text{TF}$  и скорости фиксации  $\text{PH}$  от свойств почвы [7]. Представление результатов прогноза и оценки радиационной обстановки и принятия решений на примере территории бассейна р. Горбах (приток р. Стырь в 10-километровой зоне РАЭС) схематически показано на рис. 3.

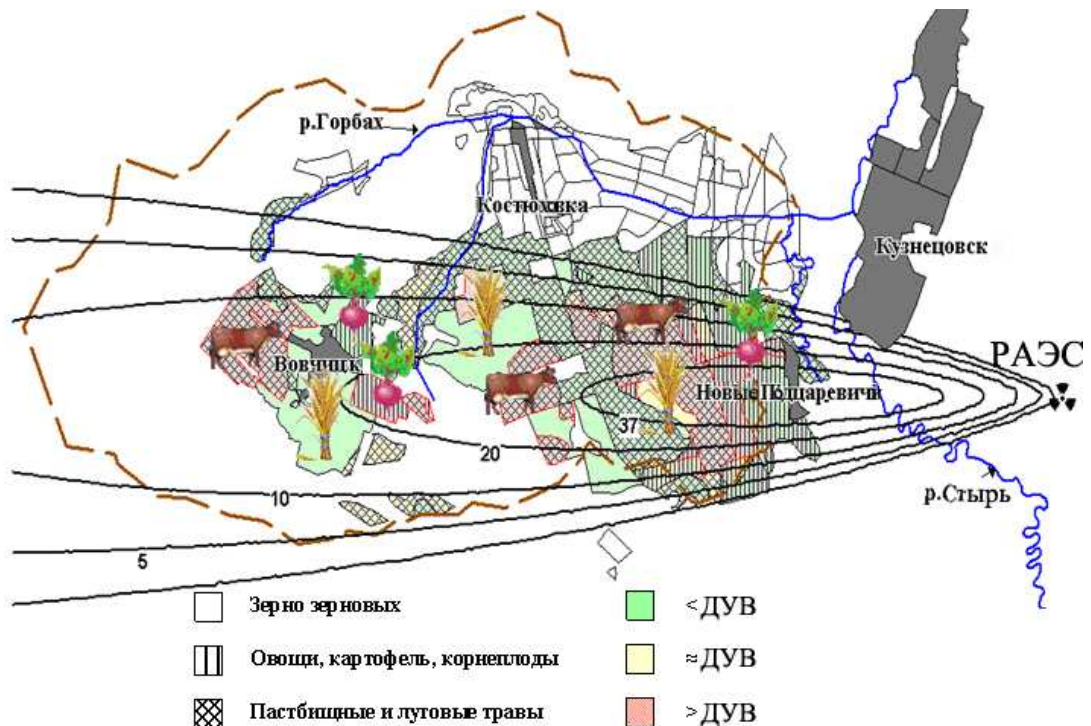


Рис. 3. Оценка удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственной продукции (аэральное загрязнение) по пространству и населенным пунктам относительно  $\text{ДУВ-6} = 2000 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$  (1-й сценарий аварии).

Расчет по комплексной радиэкологической модели позволяет получить картину распределения концентрации РН в продукции по полям севооборотов, природным угольям, элементам ландшафта и другим объектам районирования, и принять обоснованные решения, в том числе определить



приоритет оперативного мониторинга. Представление результатов прогноза и оценки радиационной обстановки и принятия решений на примере территории бассейна р. Горбах схематически показано на рис. 3. Разной штриховкой обозначены севообороты и элементы ландшафта, на которых концентрация  $^{137}\text{Cs}$  представлена в значениях кратности по отношению к допустимым уровням Украины ДР-2006 [16]. Такая форма позволяет быстро оценить возможность производства разных культур на конкретных угодьях и принять решение о необходимости применении контрмер.

#### Верификация прогноза и проблемы организации мониторинга

Карта районирования полигона по степени критичности при загрязнении почвы  $^{137}\text{Cs}$  представлена на рис. 4. Районы объединены в три группы критичности. Средние по населенным пунктам дозы по данным паспортизации нанесены в виде точек разной формы. Анализ показывает, что абсолютное большинство населенных пунктов с наиболее высокими дозами внутреннего облучения расположены в границах группы почв высокой критичности. Населенные пункты с  $D_{\text{int}} < 0,5 \text{ мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$  расположены на территории, представленной группой почв низкой критичности. Избранная методика оценки потенциальной критичности почв отражает реальную степень радиационной опасности при загрязнении территории, что можно видеть на рис. 4. Некоторые населенные пункты расположены на границе групп с разной критичностью почв и, как правило, пастбища расположены в зоне повышенной критичности, что приводит к повышенному уровню загрязнения молока и, соответственно, значению  $D_{\text{int}}$ .

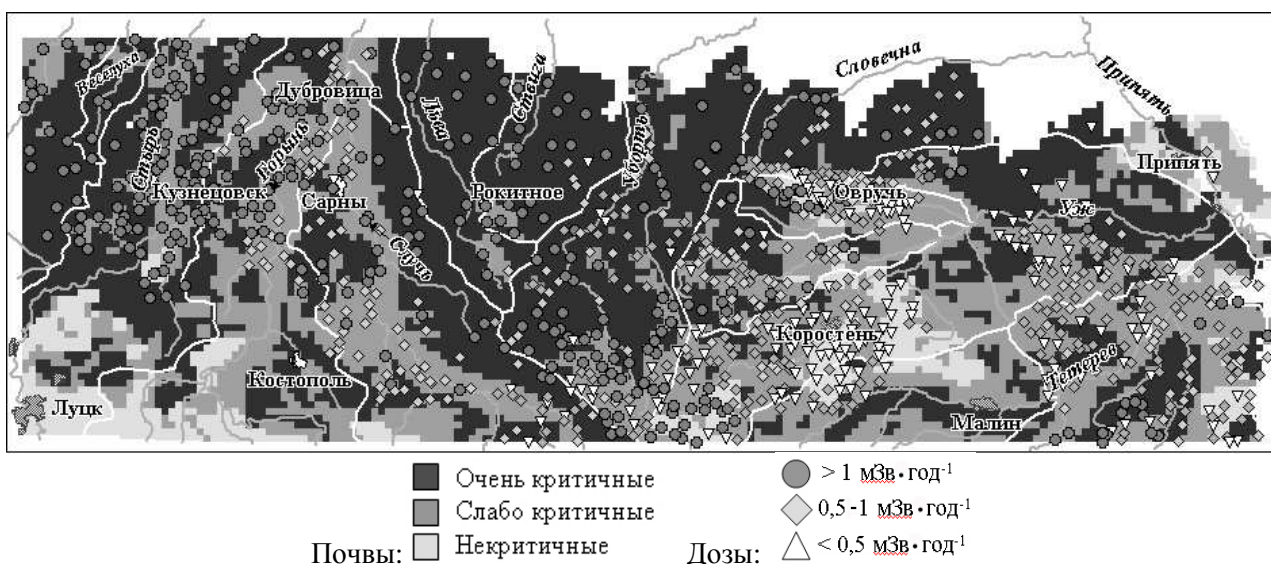


Рис. 4. Средние по населенным пунктам значения доз ( $\text{мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$ ) [17] в случае равной плотности загрязнения после аварии на ЧАЭС в 1997 г. на карте критичности радиоэкологических районов государственного уровня.

Мониторинг территорий сельскохозяйственного производства и контроль радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции представляются наиболее важными задачами. Опыт прошлых радиационных аварий показывает, что уровни загрязнения продукции сельского хозяйства и связанные с ними дозы облучения населения могут иметь очень большую вариабельность в пределах радиоактивно загрязненных территорий. Это связано с пространственной неоднородностью поля радиоактивного загрязнения территории и в значительной (иногда даже в большей) мере с разнообразием экологических характеристик, определяющих миграцию радионуклидов в системе «почва - растение - животное - продукция сельского хозяйства» и влияющих на формирование дозы облучения населения. Совместное влияние всех указанных факторов может привести к формированию „пятнистой” структуры полей радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции и природных трав. Пространственный масштаб таких пятен повышенного загрязнения урожая растений может изменяться от размеров отдельных полей или ферм (хозяйств) до участков площадью в десятки квадратных километров.

Прогноз дает ожидаемое значение параметра в точке, а мониторинг - реально наблюдаемое значение. Мониторинг должен обеспечить получение информации о фактической реализации синоптического, радиационного, хозяйственного, фенологического и других сценариев. Приоритетами мониторинга и контрмер являются территории, на которых концентрация РН в продукции приближает-

ся к значениям допустимых уровней вмешательства ДУВ или национальным пределам, и объекты, по которым введены ограничения. При превышении норматива одновременно в нескольких продуктах приоритет отдается тем, которые вносят больший вклад в дозу. При необходимости могут быть включены территории, где наблюдается превышение норматива на загрязнение продукции растениеводства или животноводства, которое может быть компенсировано проведением контрмер.

Перед проведением мониторинга должна быть проанализирована почвенная карта района контроля, при наличии нескольких почвенных разностей методика отбора проб должна быть скорректирована так, чтобы одна проба характеризовала площадь, представленную одним типом и разностью почвы. Мониторингу должны быть подвергнуты виды культур и продукты животноводства, которые вносят основной вклад в дозу внутреннего облучения населения. Для каждой пары «культура – почва» должны быть выбраны несколько участков со значительными (три - пять раз) различиями в плотности загрязнения почвы.

Оценка отдельных характеристик каждого района (экологической координаты) достигается при мониторинге путем отбора представительной пробы для каждого из объектов мониторинга с их площади. Для обеспечения репрезентативности выборки из каждого элемента ландшафта отбирают среднюю пробу из 25 отдельных образцов методом конверта. Места 25 индивидуальных проб расположены в центре и в углах большого конверта из 5 небольших конвертов правильной или неправильной формы, покрывающих всю площадь элемента. Такой метод обеспечивает погрешность  $\pm 25\%$  и сходимость в 80 % отборов проб с одного и того же участка. Индивидуальные пробы почвы и растений отбираются так, чтобы по возможности равномерно распределить их по площади контролируемого элемента территории.

### Выводы

1. Разработана методология радиоэкологического районирования загрязненной радиоактивными выпадениями после тяжелой аварии на АЭС территории с использованием ландшафтно-бассейнового принципа и ГИС-технологий.

2. Создана модель территории, таксономическими единицами которой являются элементы ландшафта или объекты сельскохозяйственного землепользования, а характеристиками служат параметры, необходимые для расчетов концентрации РН в продукции или поглощенных доз облучения населения. Районирование и разработка радиоэкологической модели территории проводятся превентивно, что позволяет до аварии оптимизировать схемы радиационного мониторинга и контроля продукции, определить контрмеры, которые могут быть необходимы после аварии.

3. Разработана методология прогнозирования и оценки радиационной обстановки при загрязнении сельскохозяйственных территорий радиоактивными выпадениями, основанная на использовании разработанных авторами моделей территории, атмосферного переноса и осаждения РН, аэрального и корневого путей поступления РН в растения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пристер Б. С., Ключников А. А., Шестопалов В. М., Кухарь В. П. Проблемы безопасности атомной энергетики. Уроки Чернобыля: монография. – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2013. – 200 с.
2. Пристер Б.С., Алексахин Р.М. Проблемы радиационной безопасности населения – уроки Кыштымской и Чернобыльской аварий. Опыт преодоления последствий техногенных аварий и развитие атомных технологий: Материалы науч.-практ. конф., посвященной 50-летию аварии на ПО “Маяк”. – Челябинск, 2007. – С. 68 - 93.
3. Пристер Б.С., Алексахин Р.М., Бебешко В.Г. и др. Чернобыльская катастрофа: эффективность мер защиты населения, опыт международного сотрудничества / Под ред. Б. С. Пристера. – К.: Энергетика и электрификация, 2007. – 100 с.
4. Радиационно-дозиметрическая паспортизация населенных пунктов территории Украины, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС, включая тиреодозиметрическую паспортизацию (Методика-96). Инструктивно-методические указания / Под ред. И. А. Лихтарева. – К., 1996. – 74 с.
5. Prister B., Perepelyatnikov G., Alexakhin R. et al. The behaviour of radionuclides in natural and semi-natural environments. - Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996. – 147 p.
6. Prister B.S., Baryakhtar V.G., Perepelyatnikova L.V. et al. Experimental Substantiation and Parameterization of the Model Describing  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  Behavior in a Soil-Plant System // Environmental Science and Pollution Research. - 2003. - Special Issue, No. 1. – P. 126 – 136.
7. Пристер Б.С., Бизольд Г., Девиль-Кавелин Ж. Способ комплексной оценки свойств почвы для прогнозиро-

- вания накопления радионуклидов растениями // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2003. – Т. 43, № 6. – С. 39 – 42.
8. Пристер Б.С. Методические рекомендации по проведению комплексного (радиоэкологического, химического) мониторинга почв и ландшафтов в окрестностях АЭС. – Л.: Гидрометеоздат. 1990. – С. 239 -249.
  9. Пристер Б.С., Барбашов С. В., Виноградская В. Д., Тищенко О. Г. Комплексное радиоэкологическое районирование территории в целях усовершенствования систем контроля, мониторинга и аварийного реагирования в зонах влияния АЭС // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2013. – Вип. 21. – С. 74–81.
  10. Глазовская М.А. О геохимических принципах классификации природных ландшафтов // Геохимия стезей и пустынь. – М.: Географгиз, 1962.
  11. Полупан М.І., Соловей В.Б., Величко В.А. Класифікація ґрунтів України / Під ред. М. І. Полупана. – К.: Аграрна наука, 2005. – 300 с.
  12. Talerko N. Mesoscale modelling of radioactive contamination formation in Ukraine caused by the Chernobyl accident // Journal of Environmental Radioactivity. – 2005. - Vol. 78. - P. 311–329.
  13. Miiller H. and Prohl G. ECOSYS-87: A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents // Health Physics. – March 1993. – Vol. 64, No. 3. - P. 232 - 252.
  14. Пристер Б.С. Закономерности внекорневого загрязнения растений радиоактивными выпадениями // Проблемы сельскохозяйственной радиоэкологии и радиобиологии при загрязнении окружающей среды молочной смесью продуктов ядерного деления. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2008. - С. 49 - 93.
  15. Критерии для использования при обеспечении готовности и реагирования в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации. Руководство по безопасности. IAEA № GSG-2. 2012.
  16. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів <sup>137</sup>Cs і <sup>90</sup>Sr у продуктах харчування та питній воді. Постанова Гол. держ. лікаря України від 03.05.2006.
  17. Загальнодержавна паспортизація населених пунктів України, які зазнали радіоактивного забруднення після Чернобильської аварії. Узагальнені дані за 2001 – 2004 р. / Під ред. І. А. Ліхтарьова. – К.: МОЗ України, 2007. - Зб. 10. – 62 с.

**Б. С. Пристер, Е. К. Гаргер, М. М. Талерко, В. Д. Виноградська, Т. Д. Лев**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп. 106, Київ, 03028, Україна*

#### **РАДІОЕКОЛОГІЧНЕ РАЙОНУВАННЯ ТА МОДЕЛЬ ТЕРИТОРІЇ ДЛЯ ЦІЛЕЙ МОНІТОРИНГУ АГРОСФЕРИ ПІСЛЯ ВАЖКОЇ АВАРІЇ НА АЕС**

Для підвищення ефективності захисту населення та сільськогосподарського виробництва від наслідків важкої аварії запропоновано превентивно, до аварії, проводити збір та аналіз картографічної, статистичної, екологічної та іншої інформації, необхідної для прогнозування та оцінки радіаційної обстановки. Розроблено методологію радіоекологічного районування території, забрудненої радіоактивними випадіннями з використанням ландшафтно-басейнового принципу та ГІС-технологій. Розроблено модель території, таксономічними одиницями якої є елементи ландшафту або об'єкти сільськогосподарського землекористування, що дає змогу погодити просторово-часовий розподіл параметрів і поєднати моделі атмосферного розповсюдження та міграції радіонуклідів по ланцюзі «ґрунт - рослини - тварини - продукція - людина». Для прогнозування радіаційної обстановки на сліді аварійного викиду використано розроблені авторами моделі атмосферного переносу радіонуклідів, аерального і кореневого забруднення рослин.

*Ключові слова:* важкі аварії на АЕС, радіоекологічна модель території, радіоекологічне районування території, прогнозування радіаційної обстановки.

**B. S. Prister, E. K. Garger, M. M. Talerko, V. D. Vinogradskaja, T. D. Lev**

*Institute for Problems of NPP safety of the NAS of Ukraine, Lysogirska, str., 12, building 106, Kyiv, 03028, Ukraine*

#### **RADIOECOLOGICAL ZONING OF TERRITORY AND MODEL OF TERRITORY FOR MONITORING OF AGROSSFIER AFTER HEAVY ACCIDENT AT THE NPP**

To improve the effectiveness of responses to severe accident in the field of population and agricultural production before the accident, proposed to prevent collect and analyze cartographic, statistical, environmental and others. The information needed to predict and assess the radiological situation. The methodology of radio-ecological zoning of the territory contaminated with radioactive fallout, using GIS technology, which was based on landscape-basin principle. A model of the territory, taxonomic units which are elements of the landscape or objects of agricultural land use. The river pond is a primary objective of the existing structural unit of the territory. The main characteristics are the type of soil, the type of terrain and the type of underlying surface. The application model provides the coordination of spatial and temporal distribution of characteristics, coupled models of atmospheric diffusion and migration of radionuclides on the

chain "soil - plants - animals - Products - man" and dosimetric models to determine countermeasures that may be necessary after the accident. To forecast the radiation environment on the track used by the accidental release of the authors developed a model of atmospheric transport of radionuclides, aeral and root of plant contamination.

*Keywords:* severe accident, radioecological model territory zoning, forecasting the radiation situation.

## REFERENCES

1. Prister B.S., Kliuchnykov A.A., Shestopalov V.M., Kukhar V.P. Problems of nuclear energy safety. The lessons of Chernobyl. – Chernobyl: Institute of safety problems of NPP, 2013. - 200 p. (Rus)
2. Prister B.S., Aleksahin R.M.. Problems of population radiation safety - Lessons Kyshtim and Chernobyl accidents. Experience of overcoming the consequences of accidents and development of nuclear power technology. Materials of scientific-practical conference dedicated to the 50th anniversary of the accident at the PA "Majak". – Cheljabinsk, 2007. - P. 68 - 93. (Rus)
3. Prister B.S., Aleksahin R.M., Bebeshko V.G. et al. he Chernobyl catastrophe: Effectiveness of population protection measures, with international cooperation // Ed. academician UAAS B. S. Prister. – Kyiv: CsTI «Energetika & elektrifikatsija», 2007. – 100 p. (Rus)
4. Radiation dosimetry certification of settlements in Ukraine, contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant, including Thyroid-dosimetry certification (Technique-96). Instructions and guidelines / Ed. I. A. Likhtarev. – Kyiv, 1996. – 74 p. (Rus)
5. Prister B., Perepelyatnikov G., Alexakhin R. et al. The behaviour of radionuclides in natural and semi-natural environments. - Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996. – 147 p.
6. Prister B.S., Baryakhtar V.G., Perepelyatnikova L.V. et al. Experimental Substantiation and Parameterization of the Model Describing  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  Behavior in a Soil-Plant System // Environmental Science and Pollution Research. - 2003. - Special Issue, No. 1. – P. 126 – 136.
7. Prister B.S., Bizold G., Devil-Kavelin Zh. Way to a comprehensive assessment of soil properties to predict the radionuclide accumulation by plants // Rad. biologija. Radioekologija. – 2003. – Vol. 43, № 6. – P. 39 – 42. (Rus)
8. Prister B.S. Guidelines for the complex (radioecological and chemical) monitoring of soils and landscape in the surrounding area nuclear power plants. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. – P. 239 - 249. (Rus)
9. Prister B. S., Barbashev S. V., Vinogradskaja V. D., Tishchenko O. G. Complex radioecological zoning for purpose of improvement control, monitoring and emergency response On the areas of NPP influence // Problemy bezpeky atomnyh elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyly). – 2013. – Iss. 21. – P. 74–81. (Rus)
10. Glazovskaja M.A. About geochemical principles of classification of natural landscapes // Geochemistry of the steppes and deserts. – Moskva: Geografis, 1962. – 187 p. (Rus)
11. Polupan M.I., Solovej V.B., Velichko V.A. Classification of soils in Ukraine. – Kyiv: Agrarna nauka, 2005. – 300 p. (Ukr)
12. Talerko N. Mesoscale modelling of radioactive contamination formation in Ukraine caused by the Chernobyl accident // Journal of Environmental Radioactivity. – 2005. - Vol. 78. - P. 311–329.
13. Müller H. and Prohl G. ECOSYS-87: A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents // Health Physics. – March 1993. – Vol. 64, No. 3. - P. 232 - 252.
14. Prister B. S. Problems of agricultural radioecology and Radiobiology at the pollution of the environment with a mixture of young fission products. – Chernobyl: Institute of safety problems of NPP, 2008. – 318 p. (Rus)
15. Criteria to be used for preparedness and response in the event of a nuclear or radiological emergency. Safety Guid. IAEA № GSG-2. 2012.
16. Acceptable levels of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in food and drinking water. Resolution of the Chief State Physician of Ukraine from 03.05.2006. (Ukr)
17. National certification settlements of Ukraine which suffered from radioactive contamination after the Chernobyl accident / Ed. I. A. Likhtarev. – Kyiv: Ministry of Health of Ukraine, 1997. - Iss. 7. – 62 p. (Ukr)

Надійшла 02.07.2015

Received 02.07.2015