

Т. Д. Лев, О. Г. Тищенко, В. Н. Пискун

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

Особенности создания картографического материала для решения задач оценки и прогноза радиоэкологической обстановки

Ключевые слова:

картография,
радиоэкологическая ситуация,
критичность территории,
районирование,
типологические
объекты, дистанционное
зондирование Земли,
ГИС-процедуры.

В зависимости от масштаба решаемых задач по оценке и прогнозу радиоэкологической обстановки¹, а также уровня принятия решений по природоохранным и реабилитационным мероприятиям предлагаются различные варианты создания цифровой картографической информации. Рассматриваются три пространственных уровня: государственный, региональный и локальный. При создании картографических слоев используются методологии ландшафтно-бассейнового и радиоэкологического районирования местности. Учитываются географические особенности территории, радиоэкологические характеристики ландшафтов, почв, растительности и актуализация этой информации по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Используется собранный и проанализированный материал по радиоэкологическим исследованиям территории радиоактивного загрязнения Украины после глобальной аварии на Чернобыльской АЭС. Изучены и предложены новые возможности использования картографического материала для решения пространственных задач радиоэкологических исследований. Предлагается методология построения базовых и оригинальных картографических слоев на трех пространственных уровнях с использованием современных геоинформационных систем (ГИС) и данных ДЗЗ.

Введение

Результаты исследований последствий крупных радиационных аварий показали, что оценка последствий воздействия аварий на население и окружающую среду требует рассмотрения и учета характеристик местности: локальных географических особенностей региона, ландшафтной структуры местности, распределения населения по территории, структуры землепользования, водопользования и сельскохозяйствен-

ного производства [1, 2]. Для выявления локальных особенностей загрязненной территории и выделения приоритетных районов внедрения реабилитационных мероприятий необходимо изучить и заблаговременно провести анализ и радиоэкологическую оценку природно-географических особенностей территорий не только вокруг АЭС, но и по всей территории Украины, используя метод радиоэкологического районирования территории [3]. Это является неотъемлемой частью процедуры экологической оценки, которая

¹ Под радиоэкологической обстановкой будем понимать пространственно-временное сочетание совокупности параметров, характеризующих степень радиоактивного загрязнения природных сред и уровни воздействия ионизирующего излучения на человека и объекты живой природы.

используется в качестве инструмента превентивного экологического регулирования хозяйственной деятельности в странах Европейского Союза [4].

Для прогнозирования оценки радиационной обстановки при выбросах из АЭС на разных пространственных масштабах, формирования сети радиоэкологического мониторинга и контроля качества продукции в Институте проблем безопасности атомных электростанций (ИПБ АЭС) НАН Украины разрабатывается структура информационной системы численного моделирования и прогноза радиационной обстановки. В структуру системы входит согласованный набор численных моделей, баз данных и технологических процедур, объединяющих и формирующих потоки информации и выполнение задач прогнозирования и мониторинга радиационной ситуации средствами геоинформационных систем (ГИС) и баз данных. Комплексный анализ разнообразной информации, полученной по разным программам (мониторинга, моделирования и прогноза) с разной периодичностью как во времени, так и в пространстве возможен при организации информации на единой методологической и программной основе. При этом создание, анализ и обработка (препроцессирование) картографической и экологической информации проводится на единой организационной, методической и программной основе, какой являются ГИС-Mapinfo10.0² и ArcGIS10.2³. ГИС используется как интегрирующий и связывающий инструмент при комплексной обработке радиоэкологической и картографической информации, а также как средство наиболее наглядного и выразительного отображения пространственного анализа, классификации, районирования и динамики изменений радиоэкологической обстановки.

Общие подходы к созданию картографического материала на разных пространственных масштабах

В соответствии с классификацией радиационных аварий [5] и в зависимости от уровня принятия управленческих решений по результатам численного и физико-статистического моделирования и прогноза радиоэкологической ситуации информационное обеспечение для поставленных задач готовится в трех

пространственных масштабах:

государственном — несколько областей, страна с площадью > 1000 км² (М 1 : 1 000 000);

региональном — территория нескольких районов, областей с площадью от 100 до 1 000 км² (М 1 : 200 000);

локальном — территория района, сельсовета, поля с площадью < 100 км² (М 1 : 100 000, 10 000).

Поскольку со временем после выпадений радиоактивных элементов на поверхность происходит их миграция в объектах окружающей среды, необходимо разделить процессы во времени, как это определено в НРБУ-97 [5], на три временные категории:

ранняя — фаза от начала выпадений до 1 месяца; делится в свою очередь на три подкатегории согласно сезонной смене подстилающей поверхности: снег, «открытая» почва, растительность;

средняя — фаза стабилизации до 1 года;

поздняя — фаза восстановления более 1 года.

В ИПБ АЭС НАН Украины оценка и прогноз радиоэкологической ситуации в разных фазах развития радиационной аварии проводится с использованием комплекса численных моделей WRF-LEDI (модель численного прогноза погоды США WRF и региональная модель атмосферного переноса и осаждения радионуклидов LEDI) и физико-статистических моделей (APLANT, SPLANT — модели оценки аэрального и корневого загрязнения продукции в острой и поздней стадиях аварии) в соответствии с нормами НРБУ-97 [6–8].

Все используемые модели согласованы между собой по входным и выходным данным и учитывают два основных фактора — масштаб и время.

Для решения комплекса численных моделей атмосферного переноса и осаждения радиоактивных веществ на подстилающую поверхность на ранней стадии аварии (WRF-LEDI) необходима следующая информация о природной среде: оперативные или архивные данные о погодных условиях для территории аварии; картографические данные о свойствах подстилающей поверхности: параметре шероховатости, типе подстилающей поверхности, типе растительности, высоте местности, структуре землепользования и т. п. Информация о погодных условиях обеспечивается результатами расчета полей метеоэлементов и характеристик пограничного слоя атмосферы на разных временных шагах, полученных по модели чис-

² MapInfo Professional. User's Guide. MapInfo Corporation. Troy, New York. May 2002. http://ftp.tware.net/cpatch/gis/mapinfo/source/mi_ug70.pdf.

³ ArcGIS – <http://desktop.arcgis.com/ru/desktop>.

ленного прогноза погоды общего пользования WRF-ARW, разработанной в США, в NCAR (National Center for Atmospheric Research) и внедренной в ИПБ АЭС НАН Украины [7]. Метеоэлементы рассчитываются в узлах регулярной сетки с горизонтальным шагом 27, 9 и 3 км, по вертикали через 20–50 м в пограничном слое атмосферы и на основных изобарических поверхностях: 1 000, 925, 850, 700, 500 гПа и т. д.

Решение физико-статистических моделей оценки радиоэкологической обстановки и степени радиоэкологической критичности территории обеспечивается базовыми цифровыми картографическими слоями на трех пространственных масштабах: топографической информацией, почвенными данными, данными о подстилающей поверхности, высотах местности, ландшафтах территории, основных бассейнах рек и данными о структуре природопользования и землепользования.

Используемые картографические данные должны быть актуальными, с соответствующим пространственным разрешением согласно типу и масштабу решаемых моделей. Это обеспечивается информационными ресурсами сети Интернет и публикуемыми данными ДЗЗ, с разным пространственным разрешением (космические снимки Landsat 7 и 8 были получены на кафедре геоинформационных систем и технологий Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, открытого источника <https://earthexplorer.usgs.gov>, а также из информационных ресурсов на сервере компании ESRI, в частности World Imagery Digital Globe ArcGIS [22]).

Картографический материал готовится в соответствии с требованиями ГИС и требованиями к тематическим данным: согласованность информации (почвы, ландшафта, подстилающей поверхности, видов растительности) и отдельных картографических слоев между собой и их экспертная оценка. В работе используются проверенные и статистически проанализированные данные: проводится анализ рельефа, обобщаются данные о почве и углах склонов по бассейнам, по типологическим единицам и т. п.

Технология получения необходимого цифрового картографического материала включает два этапа: на первом этапе — использование имеющегося или создание оригинального цифрового покрытия в соответствии с легендой данной карты; на втором этапе — из оригинальной векторной карты путем использования разработанных или стандартных ГИС-процедур создается картографический материал двух типов:

данные в узлах или по ячейкам сетки с регулярным шагом — 2 км, 500 и 250 м в зависимости от мас-

штаба решаемой задачи (сеточные данные);

типологические объекты (научно-обоснованные выделенные объекты мониторинга с близкими радиоэкологическими характеристиками, которые непосредственно влияют на миграцию радионуклидов по пищевым цепям и на формирование дозы внутреннего облучения населения).

Аналитический материал и публикации о последствиях влияния радиационных аварий на окружающую среду [9, 10] показал, что можно использовать следующие экологические характеристики, отображающие локальные особенности территории и отвечающие за радиоэкологические характеристики — миграцию радионуклидов в системе «почва — растения» и формирование дозовой нагрузки на население:

тип использования земли (landuse) и тип ландшафта (landscape);

группа почв (soil group) в рамках бассейна;

плотность населения в рамках бассейна (population density);

высота местности в рамках бассейна (elevation).

Создание согласованного картографического материала обеспечивается соблюдением бассейно-ландшафтного принципа, определяющего бассейн как устойчивую геосистему, объединенную системообразующими потоками вещества и выстроенными в четкой иерархии внутренних водосборов бассейна [11, 12]. Бассейн используется в качестве первичной объективно существующей структурной единицы территории, в которой определяются типы почвы, ландшафта и землепользования — экологические факторы, которые позволяют учесть влияние ландшафтно-геохимических условий местности на процессы осаждения на подстилающую поверхность и на растения, миграцию радионуклидов в системе «почва — растение» и формирование дозы облучения населения при поступлении радионуклидов в организм животных и человека. Критическими объектами на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению вследствие радиационной аварии, являются леса, природные лугопастбищные угодья, которые характеризуются существенно более высокими коэффициентами перехода радионуклидов из почвы в растительность по сравнению с пахотными землями. Анализ данных, относящихся к зоне Полесья, загрязненной в результате Чернобыльской катастрофы, показал, что критичность ландшафтов с точки зрения интенсивности миграции радионуклидов в трофических цепях обуславливается типом почв, к которым в основном относятся торфяные, торфяно-глеевые и торфяно-болотные почвы, для которых коэффициенты перехода радиоце-

зия в системе «почва — растение» могут превышать соответствующие значения на дерново-подзолистых почвах в 4–30 раз [8].

Построение бассейновых карт на трех уровнях имеет особенности в подготовке входных данных и представлении конечных результатов. Общими являются: 1) этапы анализа данных о высоте рельефа, которые предполагают применение инструментов для создания модели поверхности рельефа и ориентации склонов (Aspect), а также анализа гидрографических особенностей местности (Hydrology) средствами Spatial Analyst Tools ArcGis; 2) создание картографических слоев речной сети и водоемов с использованием современных космических снимков территории обследования. Связь между бассейнами на разных пространственных масштабах (государственном, региональном, локальном) осуществляется с использованием унифицированных классификаторов, в которых код (класс) бассейна на локальном уровне вклю-

чает код бассейна на региональном и государственном уровнях. На рис. 1 схематично представлена тестовая область исследований и взаимосвязь между масштабами и бассейнами с использованием вложенных сеток для разных масштабов.

Использование разных пространственных масштабов позволяет детализировать и увеличивать число экологических факторов, участвующих в анализе территории (рис. 2). Для регионального и локального уровней были введены дополнительные факторы: класс элементарного ландшафта (Landscape), класс землепользования (Landuse) и класс растительности (Vegetation).

Структура и состав картографической информации, источники данных

На основе изложенного картографический материал создается для решения задач трех основных модельных блоков методами физико-математического

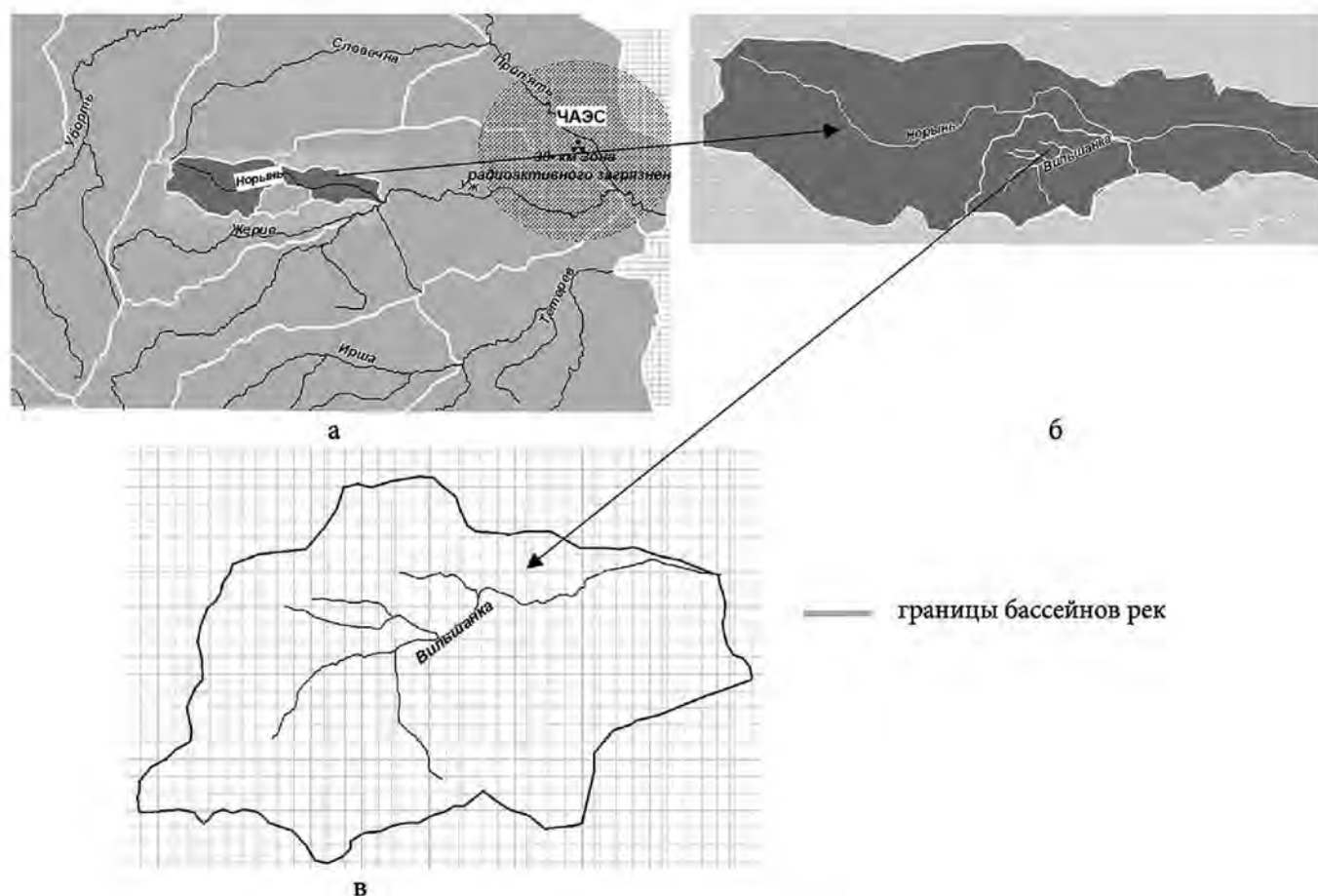


Рис. 1. Схема взаимосвязи между бассейнами на разных пространственных масштабах: а — государственный уровень (бассейн р. Припять); б — региональный уровень (бассейн р. Норын); в — локальный уровень (бассейн р. Вильшанка, приток р. Норын)

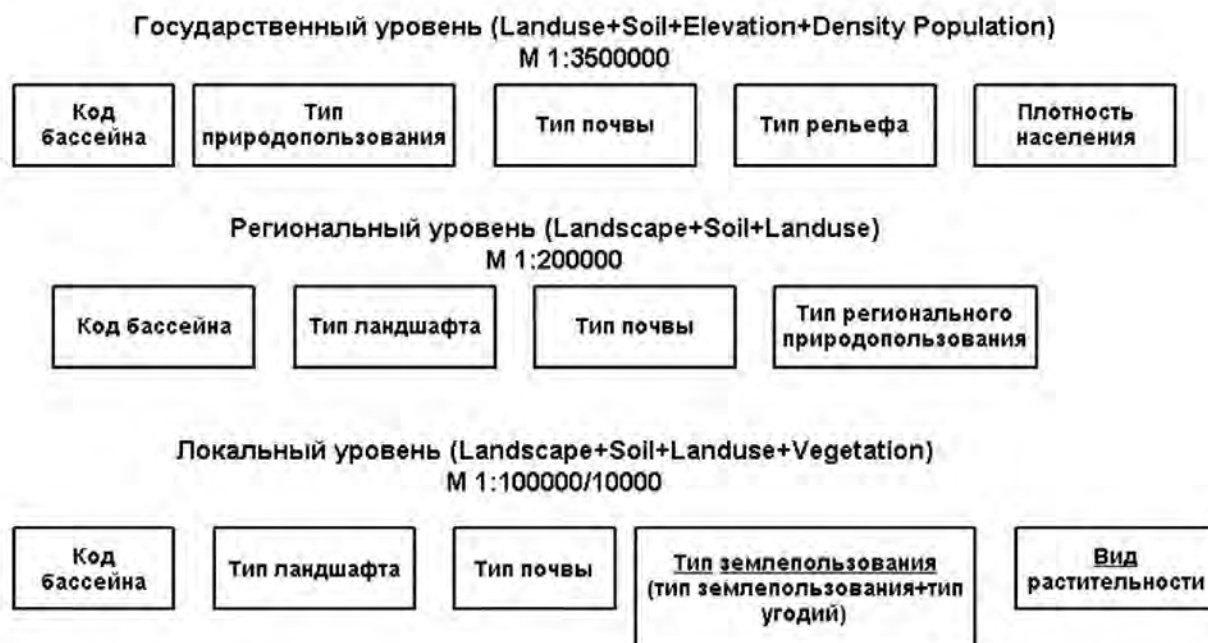


Рис. 2. Экологические параметры разного пространственного разрешения

и статистического моделирования:

превентивной оценки степени радиоэкологической критичности территории;

численного моделирования переноса и осадения радиоактивных веществ в случае радиационной аварии;

оценки загрязнения продукции и дозовой нагрузки на население на разных стадиях радиационной аварии и планирования радиоэкологического мониторинга загрязненной территории.

В соответствии с требованиями к составу и точности исходных данных для решения поставленных задач была разработана структура и состав картографической информации для разных пространственных масштабов. База картографических данных содержит информацию о природно-климатических и ландшафтных особенностях территории. Это основные характеристики местности — почва, бассейн реки, растительность, высота местности, угол склона, комплексный радиоэкологический показатель степени критичности территории. Представим состав картографической информации на разных уровнях управления принятия решений.

Государственный уровень, масштаб М 1:3500 000:

бассейновая карта с основными реками (притоками 2–3 порядка), с площадью бассейна не менее 2000 км², М 1:3 500 000;

карта бассейнов с гидрографическим районированием, М 1:200 000;

карта почв, М 1:3 500 000;

карта подстилающей поверхности с основными классами природопользования — лес, агроландшафт, луговая и болотная растительность, водная поверхность, М 1:200 000;

карта высот местности — данные SRTM⁴ V 4.1 с шагом 900 и 90 м;

карта параметра шероховатости, М 1:200 000;

карта населенных пунктов со структурой и численностью населения, М 1:200 000.

Региональный уровень, масштаб М 1:200 000:

бассейновая карта основной реки с притоками 4–5 порядков с площадью бассейна не менее 1000 км², М 1:200 000;

карта групп почв, М 1:200 000;

карта структуры регионального землепользования с основными классами — лес, агроландшафт, луговая и болотная растительность, водная поверхность, сельская территория с огородами, М 1:200 000;

карта элементарных ландшафтов, М 1:200 000;

карта высот местности — данные SRTM V 4.1 с шагом 250 и 90 м;

карта населенных пунктов, актуализированная с помощью космического снимка.

⁴SRTM V 4.1 Shuttle Radar Topography Mission collected topographic data over nearly 80 percent of Earth's land surfaces, creating the first-ever near-global data set of land elevations, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm>.

Локальный уровень, масштаб М 1 : 100 000/10 000:
карта локального бассейна (например, бассейн р. Вильшанка, М 1 : 25 000);

карта почв, М 1 : 200 000;

карта землепользования, М 1 : 10 000, созданная с использованием данных космического зондирования среднего (30 м) и высокого разрешения (менее 30 м). Доступными материалами для разработки векторных слоев карт являются данные спутника Landsat: многозональная съемка и геопривязанные космические фотоснимки земной поверхности [13];

карта границ сельсоветов;

карта рельефа с рассчитанными углами склонов и определенным типом ландшафта.

Создана пространственная база данных на основе публикаций и проведенных исследований [17] с использованием оригинальной информации интернет-портала www.diva-gis.org/gdata и Национального атласа Украины [14], она включает векторные карты:

почв, представленных в Национальном атласе Украины, М 1 : 3 500 000;

растительного покрова, М 1 : 200 000.

Для согласования картографических данных использовались геопривязанные растровые топографические карты Украины М 1 : 100 000 и публичная кадастровая карта Украины [15, 16].

Созданные покрытия для разных уровней (масштабов) в зависимости от задачи и уровня принятия решений объединялись в одну интегральную базовую карту «regular grids», представляющую собой регулярную сеть с равномерным шагом сетки по горизонтали. Шаг сетки определяется путем анализа объектов на однородность и минимальную изменчивость выбранных экологических параметров в рамках пространственных объектов (бассейн, почва, структура землепользования).

Построение цифровых карт с выделением типологических объектов основан на том, что элементарный ландшафт или его структурный элемент (почва, растительный покров) в рамках одного бассейна рассматривается как объединение территории с *однородными миграционными характеристиками*, а значения плотности выпадений радионуклидов и других характеристик в ее пределах допускает их усреднение. Такие элементы территории определяют местоположение однородной почвенной (растительной) единицы в определенном классе ландшафта в единой структурной хозяйственной единице — бассейне соответствующего пространственного масштаба.

Пример создания комплексной карты для сеточ-



Рис. 3. Состав и структура картографической базы данных

ной области и для карты типологических объектов на государственном и региональном уровнях приведен на рис. 3.

Базовая карта «regular grids» объединяет два вида информации: пространственную о местоположении объекта с характеристиками территории (бассейна, почвы, ландшафта) и тематическую о радиоэкологических особенностях объектов (параметр шероховатости, коэффициенты осадения на растительность, перехода радионуклидов в системе «почва — растения», степень критичности территории и т. п.).

Интеграция данных в регулярную сетку или типологические объекты обеспечивает согласованную работу всех математических моделей и получение результатов для комплексной оценки и прогноза радиоэкологической ситуации, а также планирования природоохранных мероприятий в рамках единой структурной единицы — бассейне соответствующего масштаба.

Рассмотрим некоторые особенности создания цифровых карт, необходимых для оценки степени природной (потенциальной) критичности территории и решения задач по математическому моделированию и оценке радиоэкологической ситуации на радиоактивно загрязненных территориях.

Некоторые особенности создания картографических данных на разных пространственных масштабах

Как было указано в предыдущих разделах, критическими объектами на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению вследствие радиационной аварии, являются леса, природные лугопастбищные

Таблица 1. Вклад (w, %) экологических характеристик в интегральный показатель радиоэкологической критичности территории на разных пространственных уровнях

Государственный уровень		Региональный уровень		Локальный уровень	
Характеристика	w, %	Характеристика	w, %	Характеристика	w, %
1. Тип природопользования	40	1. Тип элементарного ландшафта	40	1. Тип элементарного ландшафта	38
2. Тип почвы	35	2. Тип почвы	25	2. Тип почвы	24
3. Тип рельефа	15	3. Тип регионального природопользования	25	3. Тип землепользования + тип угодий	24
4. Плотность населения	10	4. Плотность населения	10	4. Вид растительности	14

угодья, которые характеризуются существенно более высокими коэффициентами перехода радионуклидов из почвы в растительность по сравнению с пахотными землями. Вклад каждого экологического фактора в интегральную оценку критичности выделенного типологического объекта оценивается по степени его влияния на формирование дозы облучения населения. Значения вкладов экологических факторов для разных пространственных масштабов представлены в табл. 1 [17].

Так, на государственном уровне максимальный вклад имеет тип природопользования (около 40 %), так как эта характеристика обуславливает в силу недостаточной детализации других данных на этом уровне оценки размещение критических объектов с точки зрения формирования дозы облучения населения. На региональном и локальном уровнях максимальный вклад (38–40 %) экспертно присвоен типу элементарного ландшафта. Это объясняется тем, что именно местоположение в бассейне водотока является базовой характеристикой выделенного объекта и определяет характерный для него тип почвы и тип землепользования. Значения вкладов почвы и типа землепользования (пашня, пастбище) равнозначны между собой. На значения коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в растения влияют практически одинаково как различия между видами растительности, так и типами почвы.

Основываясь на указанных выше особенностях, создаются тематические цифровые карты следующего содержания:

для государственного масштаба — *типы природопользования*, включающие лес, агроландшафт, луговую и болотную растительность и *группы почв*, объединенных по радиоэкологическим свойствам;

на региональном масштабе — *типы элементарных ландшафтов*, *типы регионального природопользования*, включающие дополнительный цифровой слой — территории населенных пунктов с огородами, и *группы почв*, сформированные по радиоэкологиче-

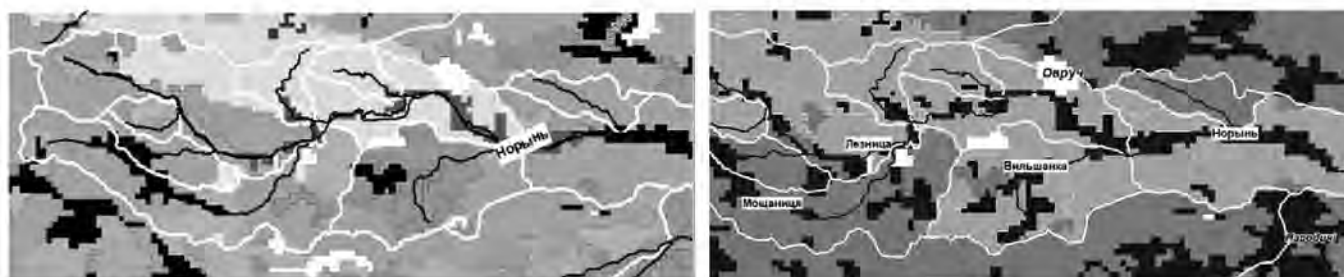
ским свойствам с учетом места произрастания растений — типа ландшафта;

на локальном уровне — *структура землепользования* с учетом типов сельскохозяйственных угодий (пашня, луг, пастбище) и видов возделываемых культур.

Принцип группировки объектов используется во избежание чрезмерного многообразия экологических признаков и включает анализ экологических особенностей и сведение выбранных к небольшому набору параметров, что позволит быстро и надежно оценить радиоэкологическую ситуацию как основу для принятия решений по устранению последствий аварии. Кроме того, на государственном и региональном уровнях для типологизации совокупности объектов целесообразнее использовать усредненные значения радиоэкологических параметров для группы почв.

Так, на государственном уровне для загрязненной территории после Чернобыльской аварии была проведена группировка типов почв, которые были характерны для масштаба М 1 : 3 500 000 с учетом их радиоэкологических свойств.

На региональном уровне выделены типологические объекты с более детальной характеристикой почв по типам ландшафта, характерной для карты масштаба М 1 : 200 000. На тестовом примере, для бассейна р. Норынь, была проведена группировка почв и оценка критичности территории, которая, как видно на рис. 4, в большинстве случаев совпадает с оценкой радиоэкологических свойств почв по типам ландшафта. Выделены наиболее критичные территории с торфяными, луговыми и болотными почвами. Использование трех параметров — типов ландшафта, почвы и природопользования — позволяет объединять однородные по радиоэкологическим свойствам территории, критически оценивать их и ранжировать в соответствии со степенью критичности по приоритетности применения природоохранных и реабилитационных мероприятий.



Типологические объекты
(код бассейна и код почвы)

- Болотные
- Дерновые песчаные и супесчаные
- Дерновые оглеенные легкосуглинистые
- Дерново-боровые и дерново-примитивные
- Дерново-подзолистые глеевые супесчаные
- Дерново-подзолистые глинистые и супесчаные
- Дерново-подзолистые с торфяно-болотными
- Дерново-подзолистые песчаные и супесчаные
- Луговые глинистые супесчаные
- Серые лесные оглеенные легкосуглинистые
- Серые лесные супесчаные и легкосуглинистые
- Торфяные и торфяники верховых болот
- Торфяные и торфяники низинных болот
- Торфяно-глеевые

а

Оценка критичности
74 типологических объектов

- очень критична
- критична
- мало критична

б

Рис. 4. Группировка почв (а) и оценка их критичности (б) в рамках бассейна на региональном уровне (р. Нoryнь, приток р. Припять)

Такой метод картографирования территорий, близлежащих к потенциально опасным радиационным объектам (АЭС) позволяет превентивно оценить и выделить наиболее критичные сельскохозяйственные районы с целью последующего внедрения реабилитационных мер и снижения внутренней дозы облучения населения в случае аварийных ситуаций.

Создание карты элементарных ландшафтов на региональном уровне

В настоящее время наиболее распространен комбинированный индивидуально-типологический подход при картографировании ландшафтов, при котором региональные и локальные свойства геосистем изучаются как в индивидуальном, так и в типологическом плане. Типы ландшафтов выделяются по однородному сочетанию отдельных компонентов. Для практических целей регионального картирования существует потребность классификационного объединения параметров без учета индивидуальных свойств объектов [18].

Наиболее весомую роль в перераспределении

выпавших на поверхность земли радионуклидов играют элементарные ландшафты, которые выполняют основные функции выноса, транспорта и аккумуляции веществ. Элементарный ландшафт в своем типичном проявлении представляет определенный тип рельефа, сложенный одной породой или наносом и покрытый в каждый момент своего существования определенным растительным сообществом. Таким образом, ландшафт — это определенная типологическая единица, которая обладает общими и частными особенностями, выраженными в относительной однородности физико-географического комплекса с закономерным пространственным сочетанием определенных форм рельефа и пестротой в распределении почвы, растительности, поверхностного и подземного стока и т. д. В табл. 2 представлены основные составляющие геосистемы, участвующие в формировании элементарных ландшафтов — элювиальных, трансэлювиальных и супераквальных типов.

Из табл. 2 и рис. 5 видно, что основными факторами формирования элементарных ландшафтов являются особенности местоположения в бассейне и характеристики рельефа — склон, пойма, водораз-

Таблица 2. Основные характеристики элементарных ландшафтов и мест их расположения радиоэкологической критичности территории на разных пространственных уровнях

Тип элементарного ландшафта	Местоположение в бассейне	Типы почв	Растительный покров	Главные миграционные процессы
Элювиальный	водоразделы, надпойменные террасы	дерново-подзолистые, дерновые, черноземы оподзоленные, светло-серые лесные	лес, полевые культуры	поверхностный смыв (вынос)
Трансэлювиальный	склоны	дерново-подзолистые, дерновые суглинистые	полевые культуры	транзит
Супераквальный	низкие террасы поймы	аллювиально-луговые, дерновые оглеенные, торфяно-болотные	луговая, пастбищная растительность	аккумуляция

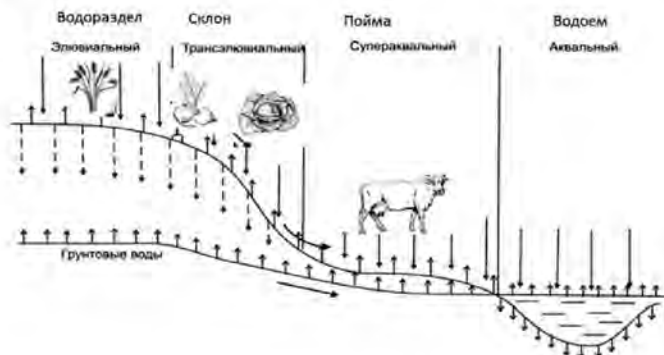


Рис. 5. Структура элементарных ландшафтов

дел, определяемые параметрами: высота и угол склона.

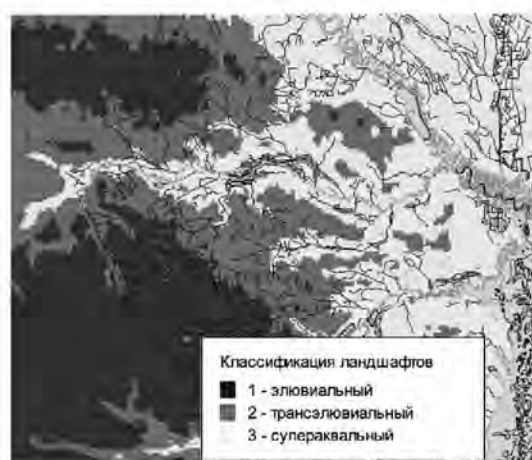
Поэтому при создании карты элементарных ландшафтов на региональном масштабе используется комбинация карт: рельефа, бассейнов, гидрографии (реки с притоками и каналами), почвы и растительности. Для Чернобыльской зоны отчуждения задача была несколько упрощена наличием созданной карты ландшафтов М 1 : 100 000 по детальным исследованиям Института географии НАН Украины [19] с учетом разнообразия и пространственной неоднородности ландшафтообразующих компонентов и природных процессов. Наша задача состояла в том, чтобы из этой детальной карты, используя современные средства ГИС и актуальные карты рельефа проекта SRTM, построить цифровую карту элементарных ландшафтов для решения задачи превентивной оценки радиоэкологической критичности территории Чернобыльской зоны. Используя данные статистической структуры рельефа (высота, угол склона) и детальные характеристики классов ланд-



Ландшафты В. С. Давыдчука

Карта бассейнов и рельефа

а



б

Рис. 6. Создание карты элементарных ландшафтов регионального уровня (б) на основе данных о рельефе и детальной ландшафтной карты (а) [19]

шафтов В. С. Давыдчука (тип рельефа, почвы и растительности), были подобраны критерии по выделению элювиальных, трансэлювиальных и суперэлювиальных типов ландшафтов. Классификация проводилась по сетке с шагом 500×500 м и результат, представленный на рис. 6, был проанализирован и сопоставлен с детальной ландшафтной картой. Неровности и понижения в виде балок, лощин с покатыми углами вошли в категорию трансэлювиального ландшафта, расположенного на низких равнинах и занимающих в этой категории около 15% территории, а на высоких равнинах (элювиальный ландшафт) они занимают около 4%. На региональном масштабе эти неровности и понижения не учитываются в классификации элементарных ландшафтов, но их доля может быть учтена при определении вклада данного параметра в миграции радиоактивных веществ в системе «почва — растение».

Создание карты природопользования с использованием ДЗЗ

Различие отражающих свойств объектов на поверхности Земли дает возможность дифференцировать и идентифицировать их по соотношению спектральных яркостей в разных зонах электромагнитного излучения. Данные космических снимков позволяют детально изучать пространственные особенности подстилающей поверхности Земли и учитывать изменения в объектах природопользования при создании цифровых карт современного содержания.

При создании карты *регионального природопользования* М 1 : 100 000, включающей дополнительный цифровой слой — территории населенных пунктов с огородами, и карты землепользования М 1 : 25 000 используются космические снимки Landsat 7 и 8 ресурса World Imagery Digital Globe ArcGIS (рис. 7) и мультиспектральные снимки территории Украины из архива ИПБ АЭС НАН Украины.

Необходимость в создании указанных карт продиктована задачами по превентивной оценке степени критичности территории и прогноза радиоэкологической ситуации, которая определяется уровнем загрязнения продуктов питания и величиной внутренней дозы облучения населения с учетом диеты питания при аварийной ситуации.

Использование технологии обработки (дешифрации) и идентификации объектов по мультиспектральным снимкам и геопривязанным фотоизображениям

подстилающей поверхности, позволяет получать актуальные карты регионального природопользования и локального землеустройства. Мультиспектральный снимок спутника Landsat 7 содержит дешифровочные признаки: текстуру и спектральную яркость объектов, выраженную в спектре шкалы 255 цветов. Комбинация спектральных каналов снимков Landsat образует контрастное цветное изображение объектов подстилающей поверхности с разрешением 30 м, что позволяет анализировать космические снимки. Синтезированный снимок 5–4–3 каналов отображает лесную растительность в зеленых и темно-зеленых цветах; здоровой травянистой растительности соответствует светлый ярко-зеленый, увядшей растительности — светло-желтые и бурые тона, открытой почве — розово-лиловый цвет (см. рис. 7, а). Сельским населенным пунктам с участками растительности на огородах характерна мозаичность текстуры снимка [20].

Использование вегетационных индексов (NDVI)⁵ также позволяет анализировать космические снимки. В результате поглощения и отражения электромагнитных волн хлорофиллом в клеточных структурах растений высокие значения яркости лежат в ближнем инфракрасном, а низкие — в красном диапазонах спектра. Большой вклад в изучение вопросов оценки растительного покрова и получения вегетационных индексов по эмпирическим данным внесли американские ученые. В США впервые для оценки урожайности сельскохозяйственных растений был применен индекс NDVI, который имеет высокую чувствительность к изменениям в растительном покрове и варьирует от -1 до +1 [21]. Формула расчета инфракрасного индекса NDVI, представляющая отношение разницы спектральной яркости инфракрасного и красного излучений к их сумме, имеет вид

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{RED} + R_{NIR}),$$

где NIR — яркость в ближней инфракрасной зоне спектра; RED — яркость в красной зоне видимого спектра электромагнитного излучения.

Для территории обследования были подготовлены космические снимки, отображающие синтез каналов электромагнитного излучения, которые используются для оценки состояния растительного покрова и объектов на поверхности Земли. По спектральной яркости объектов мультиспектрального снимка Landsat 7 (см. рис. 7, а) для дополнительного анализа простран-

⁵ NDVI – нормализованный дифференциальный вегетационный индекс.

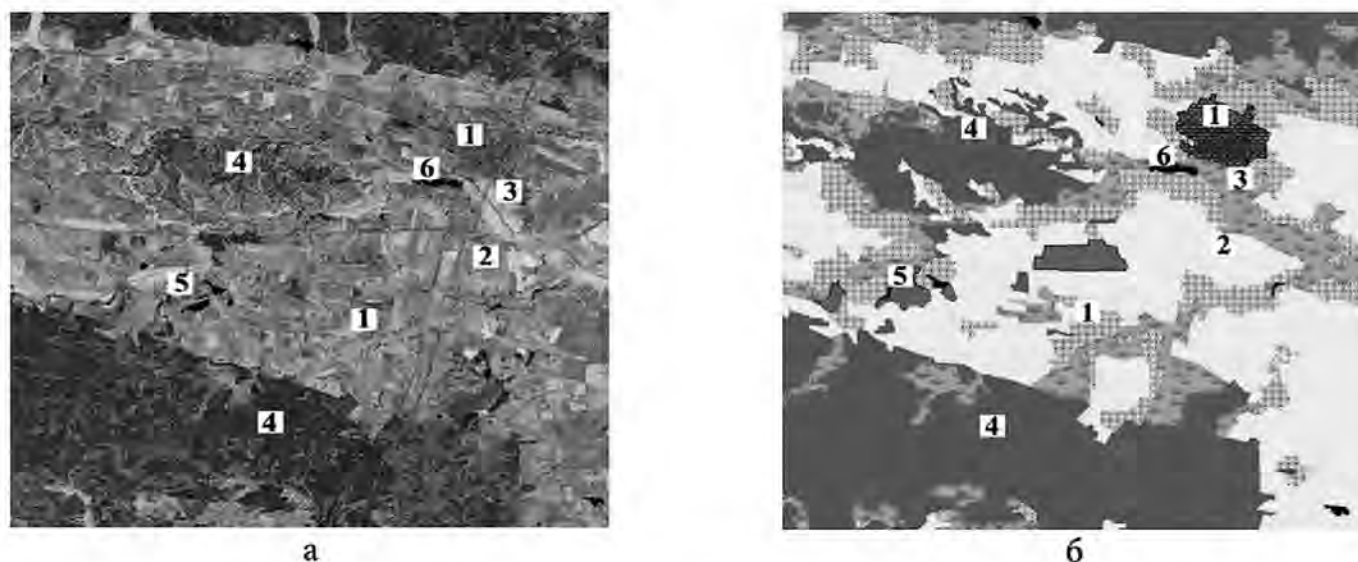


Рис. 7. Фрагмент мультиспектрального снимка Landsat 7 для тестовой территории бассейна р. Норинь (а). Карта регионального уровня (б) с выделенными классами: 1 — населенные пункты с огородами; 2 — земли сельскохозяйственного назначения (агрорландшафт); 3 — травянистая растительность в поймах рек; 4 — лес; 5 — промышленные объекты; 6 — водные объекты

ственного распределения растительности были рассчитаны вегетационные индексы. На заключительном этапе проведена классификация территории для регионального и локального природопользования (включая населенные пункты с огородами). Результаты классификации представлены на рис. 7, б и 8, б.

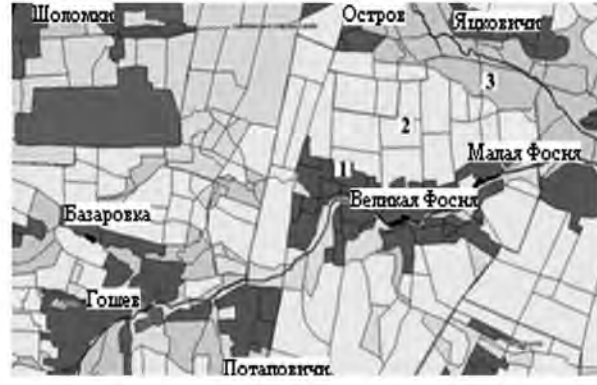
Информационное наполнение созданной векторной карты типов подстилающей поверхности и природопользования проверялось и сопоставлялось с геопривязанной топографической картой М 1 : 100 000 и схемой землепользования публичной кадастровой карты Украины [15, 16].

Пространственная структура землепользования на локальном уровне, представленная для тестового участка водосборного бассейна р. Вильшанка, притока р. Норинь, позволяет оценить агропроизводственные площади, выделить наиболее критические природные кормовые угодья (рис. 8) и участки, отведенные для выращивания овощных растений.

Использование данных космического зондирования позволяет получить современную картину землепользования на региональном и локальном уровнях, детально изучить пространственные особенности структуры сельскохозяйственных земель и растительного покрова, результаты учесть в разработке предложений по комплексному мониторингу земель и продукции, а также по внедрению реабилитационных мероприятий в случае радиационной аварии.

Представим некоторые результаты, полученные

с использованием созданного картографического материала с современной структурой землепользования. Для тестовых территорий на региональном уровне (бассейн р. Норинь) и локальном уровне (бассейн р. Вильшанка) проводилась оценка загрязнения продукции по результатам численных расчетов с использованием моделей WRF-LEDI, APLANT, SPLANT [17]. В соответствии с критериями МАГАТЕ [5, 9] по данным о внешней дозе облучения и о выпадениях радионуклидов на подстилающую поверхность рассчитывались уровни загрязнения растительности радионуклидами (^{131}I , ^{137}Cs). Результаты расчетов представлены на рис. 9. Оценка аэрального загрязнения растительности проводилась для острой фазы аварии. Загрязненная территория классифицировалась по результатам расчета удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{131}I в продукции с выделением классов очередности проведения мониторинга. Рассчитывалась динамика загрязнения продукции по суткам (15, 30, 45 суток) для острой фазы и по годам для поздней фазы аварии, затем оценивалась доля средних представительных проб для мониторинга и контроля продукции по фазам аварии. Таким образом, проведение радиозоологической оценки загрязненной территории на региональном и локальном уровнях включает: 1) выделение районов с производством сельскохозяйственной продукции — населенных пунктов с огородами, где выращиваются потребляемые населением зеленые овощные растения и корнеплоды,

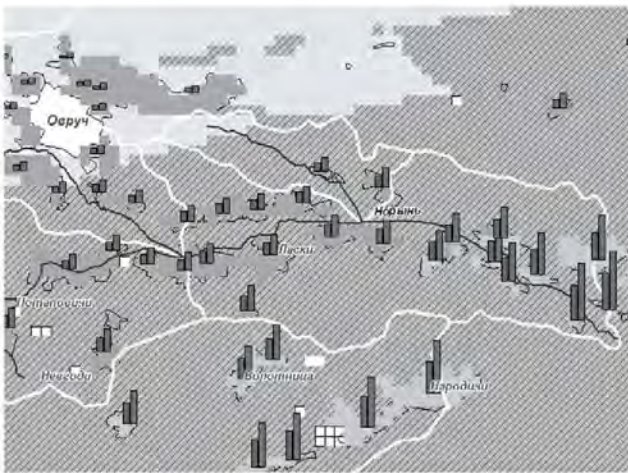


Классификация объектов землепользования с использованием Landsat 7:

- 1 – сельская застройка с огородами;
- 2 – сельскохозяйственные поля;
- 3 – луговая и болотная растительность

- 1 Сельская застройка с огородами
- 2 Сельскохозяйственные поля
- ▨ 3 Луговая и болотная растительность
- Агропромышленные предприятия
- Водоемы

Рис. 8. Локальный уровень структуры землепользования по сельским советам в границах тестового участка бассейна р. Вильшанка (Житомирская обл.)



Загрязнение овощей по нас. п. Cs137 (в сравнении с ДУВ6=2000 Бк/кг)

- 4.5
- Капуста и корнеплоды, 2 фаза
- Огурцы и томаты, 2 фаза

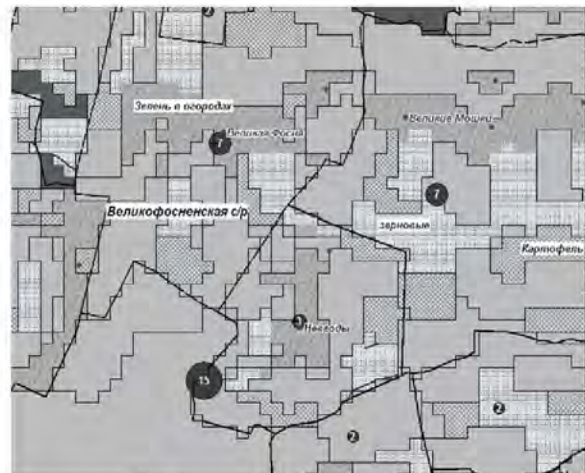
Загрязнение картофеля во 2-ой фазе Cs137 в сравнении с ДУВ6 (2000 Бк/кг)

- 0.02 to 0.04
- 0.002 to 0.02

Зонирование по внешней дозе ДУВ1-ДУВ4

- ▨ Зона с ДУВ3 = 1-100 мкЗв/ч
- ▨ Зона с ДУВ4 = 0-1 мкЗв/ч

а



Загрязнение зелени в огородах I-131, Бк/кг (ДУВ6 = 3000 Бк/кг)

- 213 000 - 436 000
- ▨ 105 000 - 213 000
- Проводится 5% контроль продукции
- ▨ Зерновые культуры 1ф - Некритичны
- ▨ Картофель, корнеплоды - некритичны

Количество проб по с/р

- 15
- 7.5
- 1.5

■ Количество проб

б

Рис. 9. Оценка загрязнения продукции на региональном (а) и локальном (б) уровнях с использованием актуальных карт землепользования

а также территории фермерских хозяйств с учетом структуры землепользования и севооборота; 2) оценку загрязнения продукции и расчет объемов мониторинга продукции.

Выводы

В результате выполненного исследования предложены методические подходы к созданию и подготовке актуального картографического материала для решения задач математического и физико-статистического моделирования и оценки радиоэкологической обстановки в трех пространственных масштабах: государственном, региональном и локальном. Создание актуального цифрового картографического материала базируется на современных ГИС и высокоточных данных ДЗЗ, а также включает современные данные о почве, подстилающей поверхности, высотах местности, ландшафтах, основных бассейнах рек и структуре природопользования и землепользования. Вся подготовленная информация создается в соответствии с требованиями используемых моделей и согласовывается между собой после проведения экспертной оценки. Многоуровневый подход к оценке радиационной обстановки позволяет методом телескопизации переходить от одного уровня к следующему, уточняя информацию, обеспечивающую решение задачи оптимизации и соблюдение приоритетов при проведении защитных мероприятий.

Для повышения эффективности защиты населения и соблюдения нормативов по продукции сельскохозяйственного производства в случае тяжелой аварии предлагается превентивно, до аварии, по изложенной технологии создавать картографическую информацию, проводить сбор и анализ статистической и экологической информации, необходимой для прогнозирования и оценки радиоэкологической обстановки. Сбор и создание картографической информации, прогнозирование радиационной обстановки выполняется на единой картографической основе с привлечением решений на заданных регулярных сетках, которые могут уточняться сразу после получения сигнала об аварии по реализованным сценариям. Предложенная схема создания картографии для оценки радиоэкологической обстановки и организации мониторинга позволяет последовательно классифицировать элементы территории по степени радиоэкологической критичности, последовательно выделять приоритетные объекты, планировать сеть мониторинга на разных пространственных уровнях.

На локальном уровне, где непосредственно пла-

нируются объемы мониторинга и контрмер, предлагается использовать подробную информацию по данным ДЗЗ.

Список использованной литературы

1. Проблемы безопасности атомной энергетики. Уроки Чернобыля / Б. С. Пристер, А. А. Ключников, В. М. Шестопапов, В. П. Кухарь. — Чернобыль, 2013. — 200 с.
2. Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС // Методические рекомендации по проведению комплексного (радиоэкологического, химического) мониторинга почв и ландшафтов в окрестностях АЭС; под ред. К. П. Махонько. — Л. : Гидрометеоздат, 1990. — С. 239–249.
3. Радиоэкологическое районирование и модель территории для целей мониторинга агросферы после тяжелой аварии на АЭС / Б. С. Пристер, Е. К. Гаргер, Н. Н. Талерко [та ін.] // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2015. — Вип. 25. — С. 54–65.
4. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення. — Київ, 2006. — 240 с.
5. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. ДГН 6.6.1.–6.5.001-98. — Київ : УЦГСЭН, 1998. — 135 с.
6. Проблемы диагностирования и прогнозирования радиационной обстановки окружающей среды АЭС Украины в случае коммунальной аварии / А. А. Ключников, Е. К. Гаргер, Б. С. Пристер [та ін.] // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2010. — Вип. 14. — С. 8–16.
7. WRF-ARW. Version 3.1. Modeling System User's Guide. User's Guide for the NMM core of the Weather Research and Forecast (WRF) modeling system, 2008. — Available at: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>.
8. Изучение особенностей закономерностей поведения продуктов ядерных взрывов в природных процессах, биологических и сельскохозяйственных цепочках / Б. С. Пристер и др. — Фонд ОНИС ПО «Маяк», 1975. — Инв. № ОН-630.
9. Общее руководство по безопасности № GSG-2. Критерии для использования при обеспечении готовности и реагирования в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации / Международное агентство по атомной энергии. — Вена : МАГАТЭ, 2011. — 96 с.
10. Пристер Б. С. Проблемы сельскохозяйственной радиологии и радиобиологии при загрязнении окружающей среды молодой смесью продуктов ядерного деления / Б. С. Пристер. — Чернобыль, 2008. — 321 с.

11. Глазовская М. А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов / М. А. Глазовская. — Смоленск: Ойкумена, 2002. — 145 с.
12. Басейново-ландшафтный принцип в оцінюванні ступеня радіоекологічної критичності території України / Т. Д. Лев, Б. С. Прістер, В. Д. Виноградська [та ін.] // Укр. геогр. журн. — 2018. — № 4 (104). — С. 49–58.
13. Данные космической съемки поверхности Земли спутника Landsat / ArcGIS. — Режим доступа: http://goto.arcgisonline.com/map/World_Imagery.
14. Національний атлас України. Електронна версія. — Режим доступа: <http://www.isgeo.com.ua>.
15. Интерактивная топографическая карта Украины 1 : 100000. — Режим доступа: <http://maps.vlasenko.net>.
16. Публичная кадастровая карта Украины. — Режим доступа: <http://map.land.gov.ua/kadastrova-karta>.
17. Preventive radioecological assessment of territory for optimization of monitoring and countermeasures after radiation accidents / B. S. Prister, V. D. Vinogradskaya, T. D. Lev [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. — Vol. 184–185, April 2018. — P. 140–151.
18. Исаченко А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование / А. Г. Исаченко. — М. : Высш. шк., 1991. — 366 с.
19. Ландшафты Чернобыльской зоны и их оценка по условиям миграции радионуклидов / В. С. Давыдчук, Р. Ф. Зарудна, С. В. Михели [и др.]. — Київ : Наук. думка, 1994. — 112 с.
20. Кохан С. С. Дистанційне зондування Землі. Теоретичні основи / С. С. Кохан, А. Б. Востоков. — К. : Вища шк., 2009.
21. Класифікація земного покриву Карпат з використанням наземного хлорофільного індексу та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS / В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева // Космічна наука і технологія. — 2006. — Т. 12, № 5/6. — С. 10-14.
22. World Imagery Digital Globe ArcGIS. — Available at: http://server.arcgisonline.com/arcgis/services/World_Imagery/MapServer.

Т. Д. Лев, О. Г. Тищенко, В. М. Піскун

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

Особенности створення картографічного матеріалу для вирішення завдань оцінки і прогнозу радіоекологічної обстановки

Залежно від масштабу завдань, що вирішуються під час оцінки та прогнозу радіаційної обстановки, і рівня прийняття рішень із природоохоронних та реабілітаційних заходів пропонуються різні варіанти створення цифрової картографічної інформації. Розглядаються три просторових рівня: державний, регіональний і локальний. При створенні картографічних шарів використовуються методології ландшафтно-басейнового і радіоекологічного районування місцевості. Враховуються географічні особливості території, радіоекологічні характеристики ландшафтів, ґрунтів, рослинності та актуалізація цієї інформації за даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Використано та проаналізовано матеріал, що був зібраний за радіоекологічними дослідженнями території радіоактивного забруднення України після глобальної аварії на Чорнобильській АЕС. Вивчено та запропоновано нові можливості створення та використання картографічного матеріалу для вирішення просторових задач радіоекологічних досліджень. Пропонується методологія побудови базових і оригінальних картографічних шарів на трьох просторових рівнях із використанням сучасних геоінформаційних систем (ГІС) і даних ДЗЗ.

Ключові слова: картографія, радіоекологічна ситуація, критичність території, районування, типологічні об'єкти, дистанційне зондування Землі, ГІС-процедури.

T. D. Lev, O. G. Tishchenko, V. N. Piskun

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 12, Lysogirska st., Kyiv, 03028, Ukraine*

Features of Cartographic Information Creation for Solving the Problems of Assessment and Forecast of Radioecological Situation

Depending on the scale of the tasks that must be performed when assessing and predicting the radioecological situation and the level of decision-making on environmental and rehabilitation measures, various options are proposed for creating digital cartographic information. Three spatial levels are considered: state, regional and local. When creating cartographic layers, the methodologies of landscape-basin and radioecological zoning of the territory are used. The geographical features of the territory, the radioecological characteristics of

landscapes, soils, vegetation and the updating of this information according to remote sensing data are taken into account. The collected material on radioecological studies of the territory of radioactive contamination of Ukraine after the global accident at the Chornobyl nuclear power plant was used, analyzed and implemented in our research. New possibilities of using cartographic material to solve the spatial problems of radioecological research were studied and proposed. Cartographic data on the properties of the underlying surface: roughness parameter, type of underlying surface, type of vegetation, terrain height, land use structure and other data are agreed upon after an expert assessment. The prepared maps and attributive information about the natural and environmental characteristics of the territory are used to assess and predict the radioecological situation at different stages of the development of a radiation accident using a complex of numerical and physico-statistical models developed at the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine (atmospheric transport models and models for calculating aerial and root vegetation contamination). A methodology is proposed for constructing basic and thematic cartographic layers using two methods (for ordinary network cells and typological objects) at three spatial levels using modern geographical information systems (ArcGIS, MapInfo) and remote sensing data, taking into account the requirements of models. Radioecological zoning is carried out and the degree of criticality or vulnerability of the territories of possible radioactive contamination is assessed.

Keywords: cartography, radioecological situation, criticality of the territory, zoning, typological objects, remote sensing, GIS procedures.

References

1. Prister B. S., Klyuchnikov A. A., Shestopalov V. M., Kukhar' V. P. (2013). *Problemy bezopasnosti atomnoy energetiki. Uroki Chernobylya* [Safety issues of nuclear energy. Lessons from Chernobyl]. Chornobyl, 200 p. (in Russ.)
2. Makhon'ko K. P. (ed.) (1990). *Rukovodstvo po organizatsii kontrolya sostoyaniya prirodnoy sredy v rayone raspolozheniya AES* [Guide on the organization of environmental monitoring in the area of the NPP location]. In: *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu kompleksnogo (radioekologicheskogo, khimicheskogo) monitoringa pochv i landshaftov v okrestnostyakh AES* [Methodological recommendations for conducting comprehensive (radioecological, chemical) monitoring of soils and landscapes in the vicinity of the
3. Prister B. S., Garger E. K., Talerko N. N., Vinogradskaya V. D., Lev T. D. (2015). [Radioecological zoning and model territory for the purposes of monitoring agrosphere after a serious accident at the nuclear power plant]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 25, pp. 54–65 (in Russ.)
4. *Vodna ramkova dyrektyva JeS2000/60/ES: Osnovni terminy ta jikh vyznachennja* [EU Water Framework Directive 2000/60/EC Definitions of Main Terms]. Translated by V. Lozanskyi. Kyiv, 2006, 240 p. (in Ukr.)
5. *NRBU-97 Norms of radiation safety of Ukraine*. DGN6.6.1.–6.5.001-98 State Hygiene Standards. Kyiv: USGSEN, 135 p. (in Ukr.)
6. Klyuchnikov A. A., Garger E. K., Prister B. S., Lev T. D., Talerko N. N. (2010). [Problems of diagnostics and forecasting of the radiation environment of the Ukrainian NPP in the event of a communal accident]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 14, pp. 8–16. (in Russ.)
7. *WRF-ARW. Version 3.1. Modeling System User's Guide*. User's Guide for the NMM core of the Weather Research and Forecast (WRF) modeling system, 2008. Available at: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>.
8. Prister B. S. (1975). *Izuchenie osobennostey zakonomernostey povedeniya produktov yadernykh vzryvov v prirodnykh protsessakh, biologicheskikh i sel'skokhozyaystvennykh tseppokkakh* [The study of the features of the behavior of the products of nuclear explosions in natural processes, biological and agricultural chains]. ONIS Foundation, PA "Mayak". (in Russ.)
9. International Atomic Energy Agency (2011). *General Safety Guide GSG-2. Criteria for use in emergency preparedness and response in the event of a nuclear or radiological emergency*. Vienna: IAEA, 96 p.
10. Prister B. S. (2008). *Problemy sel'skokhozyaystvennoy radioekologii i radiobiologii pri zagryaznenii okruzhayushchey sredy molodoy smes'yu produktov yadernogo deleniya* [Problems of agricultural radioecology and radiobiology in environmental pollution by a young mixture of nuclear fission products]. Chornobyl, 321 p. (in Russ.)
11. Glazovskaya M. A. (2002). *Geokhimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovaniy prirodnykh landshaftov* [Geochemical fundamentals of typology and research methods of natural landscapes]. Smolensk: Oykumena, 145 p. (in Russ.)
12. Lev T. D., Prister B. S., Vynogradskaya V. D., Tyshhenko O. G., Piskun V. M. (2018). *Baseinovo-landshaftnyi pryntsyp v*

- otsiniuvanni stupenia radioekolohichnoi krytychnosti terytorii Ukrainy [Basin-landscape principle in assessing the degree of radioecological criticality of the territory of Ukraine]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal* [Ukrainian Geographical Journal], vol. 104, no. 4, pp. 49–58. (in Ukr.)
13. *Landsat satellite imagery data*. Available at: http://gto.arcgisonline.com/map/World_Imagery.
 14. *National Atlas of Ukraine*. Electronic version. Available at: <http://www.isgeo.com.ua>. (in Ukr.)
 15. *Interactive topographic map of Ukraine 1 : 100000*. Available at: <http://maps.vlasenko.net>. (in Ukr.)
 16. *Public Cadastral Map of Ukraine*. Available at: <http://map.land.gov.ua/kadastrova-karta>. (in Ukr.)
 17. Prister B. S., Vinogradskaya V. D., Lev T. D., Talerko M. M., Garger E. K., Onishi Y., Tischenko O. G. (2018). Preventive radioecological assessment of territory for optimization of monitoring and countermeasures after radiation accidents. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 184–185, pp. 140–151.
 18. Isachenko A. G. (1991). *Landshaftovedenie i fiziko-geograficheskoe rayonirovanie*. [Landscape science and physical-geographical zoning]. Moscow: Vyshcha Shkola, 366 p. (in Russ.)
 19. Davydchuk V. S., Zarudna R. F., Mikheli S. V., Petrov M. F., Sorokina L. Yu., Tkachenko A. N. (1994). *Landshafty Chernobyl'skoy zony i ikh otsenka po usloviyam migratsii radionuklidov*. [Landscapes of the Chernobyl zone and their assessment according to the conditions of migration of radionuclides]. Kyiv: Naukova dumka, 112 p. (in Russ.)
 20. Kohan S. S., Vostokov A. B. (2009). *Dystantsiine zonduvannia Zemli. Teoretychni osnovy* [Earth Remote Sensing. Theoretical foundations]. Kyiv: Vyshcha shkola. (in Ukr.)
 21. Lialko V. I., Shportiuk Z. M., Sakhatskyi O. I., Sybirtseva O. M. (2006). [Classification of the Carpathian land cover using the land chlorophyll index and the red edge position according to the MERIS video spectrometer]. *Kosmichna nauka i tekhnologia*. [Space science and technology], vol. 12, no. 5/6, pp. 10-14. (in Ukr.)
 22. *World Imagery Digital Globe ArcGIS*. Available at: http://server.arcgisonline.com/arcgis/services/World_Imagery/MapServer.

Надійшла 18.10.2019

Received 18.10.2019