

УДК 504.064.3:528.8.04:630:(632.118.3+632.4+632.7+614.84)](477.41)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПРИРОДНОЙ
ПОЖАРООПАСНОСТИ ЛЕСОВ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ**

Лялько В.И., Азимов А.Т., Сахацкий А.И., Ходоровский А.Я., Шпортюк З.М., Сибирицева О.Н.

РЕЗЮМЕ

Растительность сыграла важнейшую роль в локализации загрязнения в пределах Чернобыльской зоны отчуждения (ЗО), но, в свою очередь, подверглась воздействию токсикантов. Поэтому контроль ее состояния является необходимой частью экологических исследований. Методология работ основана на изучении спектральных характеристик растительности в различных диапазонах спектра электромагнитных волн. Исследование экологического состояния окружающей среды выполнено на основе использования разновременных многозональных космических снимков высокого пространственного разрешения, полученных с различных спутников в 1980-1998 годы. Решались две главных задачи: 1) оценка влияния радионуклидного загрязнения на состояние растительности; 2) классификация видового состава, фитосанитарного состояния и естественной пожароопасности лесов. Обширные данные наземных исследований использовались для анализа результатов и установления корреляционных зависимостей. В результате решения поставленных задач было установлено, что все виды растительности подвержены влиянию радионуклидного загрязнения. Наибольшие изменения были зарегистрированы для сосновых лесов. Выполненная классификация позволила выделить 19 классов растительности. Были построены схемы экологического состояния и природной пожароопасности лесов района. Полученные результаты подтверждаются наземными заверочными исследованиями.

ВВЕДЕНИЕ

Использование материалов космической съемки особенно эффективно в областях природных и техногенных экологических катастроф, которые охватывают обширные территории и где присутствие людей должно быть ограничено. Это полностью относится к Чернобыльской ЗО. Вследствие аварии на ЧАЭС загрязнению были подвержены значительные площади. Особенно высокие уровни радиоактивного загрязнения остаются в пределах Зоны. Главным фактором, который содействовал задержке распространения радиоактивного загрязнения, была растительность, и в первую очередь лесная.

Лесные массивы занимают около 50 % площади территории ЗО. По данным карт лесопользования, составленных в 1996 году, в районе преобладают сосновые

древостой, которые главным образом искусственно высажены в послевоенные годы. Кроме того, встречаются лиственные леса, которые представлены березой, ольхой, осиной, дубом и некоторыми другими породами деревьев. Наравне с чисто сосновыми массивами достаточно широко развиты лиственные и смешанные леса различного состава.

После аварии структура землепользования ЗО достаточно сильно изменилась. Происходит залесение прежних сельхозугодий, леса Зоны подверглись радиационному воздействию, ослаблены пожарами, буреломами, развитием очагов вредителей и болезней. В последние годы отмечаются вспышки развития первичных вредителей сосны: соснового шелкопряда, шелкопряда-монашки, обычного соснового пильщика и т.д., что ведет к накоплению значительных объемов сухостоя и увеличивает вероятность возникновения пожаров. Для предупреждения поражения лесов вредителями проводится авиахимобработка, но и при этом возможность возникновения повторных вспышек вредителей остается достаточно высокой на протяжении 3–5 лет после первого их появления. Прекращение на значительных площадях ухода за лесом (уборка сухостоя, захламленность) значительно увеличило риск возникновения пожаров. Как следствие особенно значительные площади лесов Зоны были повреждены пожарами в 1992 году.

На основании вышеупомянутого, главными задачами, которые стоят при изучении растительности ЗО, являются:

- уточнение состава и границ распространения растительных сообществ;
- определение фитосанитарного состояния лесов;
- определение степени природной пожароопасности территорий.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Радиоэкологические исследования

Для изучения радиоэкологических условий ЗО был использован метод фитоиндикации, основанный на анализе спектральных характеристик основных видов растительности в пределах Зоны. Как известно, между спектральными характеристиками листвы в узких диапазонах спектра электромагнитных волн и условиями произрастания растительности существует функциональная зависимость [1, 5].

Метод фитоиндикации экологических условий оперативный и экономичный. Наличие космических снимков прошлых лет позволяет для более чем 20-летнего периода выполнять сравнительное изучение экологической ситуации в пределах ЗО, что невозможно сделать другими методами. Исходными материалами для исследований были снимки, полученные со спутников: «Космос» (сделан 10.06.1980 г. камерой КАТЭ-200); Landsat TM (16.04.1984 г.); SPOT (06.05.1986 г.); Landsat TM (29.05.1988 г.); «Ресурс» (27.07.1989 г., камера МК-4); SPOT (23.08.1995 г.).

Анализ данных разновременной многозональной космической съемки показал, что для всех видов растительности отмечается зависимость между спектральной

яркостью в красной и ближней инфракрасной зонах спектра и содержанием ^{137}Cs в почве (которое определялось по карте Нагорского В.А., 1992 г.). Эта зависимость имеет отчетливый одномодальный вид. Наиболее ярко она проявилась для сосны обыкновенной. Радионуклиды оказали влияние как на пигменты листьев (хлорофилл и др.), так и на строение клеток. На это указывает смещение в область повышенных значений спектральных яркостей растительности во всех зонах спектра при увеличении содержания в почве радионуклидов [3, 5, 10–12].

Максимальные различия между аномальными и фоновыми значениями радиоактивности почв, судя по построенным графикам, наблюдались в 1986 г., минимальные – в 1995 г. Уменьшение различий произошло, прежде всего, за счет повышения фоновых значений, что связано с горизонтальной миграцией радионуклидов.

Зависимости между спектральными яркостями различных видов растительности и содержанием ^{137}Cs в почвах были использованы для построения схемы загрязнения почв токсикантами, преимущественно ^{137}Cs , в зоне влияния аварии на ЧАЭС. Схема построена по результатам анализа интегрального воздействия токсикантов за 1986–1989 годы на спектральные яркости растительности. Оптические свойства растительности замерялись на многозональном космическом снимке с ИСЗ «Ресурс» 27.07.1989 г.

Наиболее крупный по площади и интенсивности загрязнения максимум расположен в районе ЧАЭС. От него протягивается три максимума первого порядка, состоящие из локальных минимумов и максимумов содержания радионуклидов, расположение которых контролируется строением рельефа.

Максимум к югу от ЧАЭС совпадает с известным южным следом аварии. Повышенные содержания радионуклидов приурочены к долинам наиболее крупных рек, к северным окраинам лесных массивов, к локальным поднятиям в рельефе. Пониженные содержания характерны для южных склонов водоразделов и южных окраин лесных массивов, для крупных локальных понижений в рельефе.

Максимум загрязнения, совпадающий с долиной р. Припять, характеризуется очень узким интервалом колебаний значений содержания ^{137}Cs , вероятно, из-за отсутствия барьеров на пути переносимых ветром радионуклидов.

Наблюдаемые на схеме закономерности в пространственном распределении радионуклидов аналогичны установленным по данным наземных исследований. Это подтверждает достоверность построенной схемы.

КЛАССИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Для контроля состояния лесных массивов в ЗО нами использовался многозональный космический снимок спутника SPOT-4 (Франция), выполненный 14 июля 1998 г. в четырех каналах: зеленом в диапазоне длин волн 0,50–0,59 мкм, красном (0,61–0,68 мкм), ближнем инфракрасном (0,79–0,89 мкм) и среднем инфракрасном (1,58–1,75 мкм). Пространственное разрешение на местности равняется 20 м в пикселе. Размеры снятой площади составляют 60×60 км, т.е. снимок покрывает большую часть ЗО.

Для классификации территории с помощью указанного космоснимка нами использовался программный продукт ERDAS Imagine, который является признанным лидером среди программных продуктов подобного назначения. Эта программа широко используется для обработки спутниковой информации во многих научных и производственных центрах ведущих стран Запада (США, Германия, Франция, Италия и др.). Программный продукт MapInfo, который нами использовался в качестве географической информационной системы (ГИС) для накопления, обработки первичных данных и представления полученных результатов в графической форме, давал возможность обмена данными с ERDAS Imagine.

Методика классификации в первом приближении разделяется на две части: обучение и собственно классификация с использованием определенного способа получения решения. "Обучение" проводилось в интерактивном режиме. Был проведен выбор пикселей, которые представляют собой определенный класс. Для идентификации этих пикселей использовались данные по инвентаризации лесов 1996 года, которые в большинстве своем были актуализированы наземными исследованиями в 1998 и 1999 годах.

Результатом "обучения" был набор сигнатур, которые связываются с определенным классом и используются программой для сортировки пикселей снимка. После создания надежных сигнатур классов и их оценки, проводилась собственно классификация данных космоснимка. Независимо анализировался каждый пиксель изображения. Вектор измерения каждого пикселя сопоставлялся с каждой сигнатурой в соответствии с методом решения или алгоритмом. Пиксели, удовлетворяющие критериям, которые устанавливаются определенным методом решения, относились к тому классу, сигнатуры которого более всего приближены к значениям спектральных яркостей данного пикселя. ERDAS Imagine позволяет проводить классификацию следующими методами: минимального расстояния; расстояния Махаланобиса; максимальной вероятности.

Результирующие сигнатуры отдельных классов объектов были созданы на основе наземных данных изучения лесов Зоны. Всего было использовано 438 тест-участков, которые характеризуют главные типы растительных сообществ. С целью установления точного размещения участков была выполнена векторизация отдельных кварталов и выделов по схемам лесоустройства с помощью ГИС MapInfo. Для этого проводилось сканирование схем лесничеств с дальнейшей точной координатной привязкой сканированных изображений. Затем с помощью программы MapInfo создавались векторные изображения необходимых кварталов и выделов в системе координат Гаусса-Крюгера. Эти векторные изображения были совмещены с космоснимком с помощью программы ERDAS Imagine, что обеспечило сопоставление данных спутника с лесотехническим описанием отдельных участков.

Все первичные данные были сведены в таблицу, которая содержит информацию о прямоугольных координатах каждого исследуемого объекта, модальные значения спектральных яркостей в разных каналах, значения основных

вегетационных индексов, параметры растительности (возраст, бонитет, запасы и др.).

В результате были созданы сигнатуры 25 классов лесной растительности и природных объектов, проведена оценка сигнатур этих классов с целью прогнозирования надежности классификации в зависимости от метода, по которому она выполнялась.

Установлено [2, 4, 6], что наименьшую погрешность при классификации приведенных данных дает метод наибольшей вероятности. Это подтверждают данные наземной проверки. Некоторые результаты классификации растительных сообществ ЗО представлены на рисунке 1, где приведены основные классы лесной растительности. По данным других исследователей, при классификации лесной растительности иных регионов метод наибольшей вероятности также показал наилучшие результаты.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

А) Наиболее надежно всеми методами выделяются:

- сосна обыкновенная возрастом более 30 лет;
- сосна обыкновенная возрастом 15–30 лет;
- сосна обыкновенная, которая повреждена сосновым шелкопрядом;
- разнообразные лиственные леса, которые достаточно надежно отделяются

от сосновых.

Б) Для классификации разновидностей лиственных лесов с преобладанием отдельных видов более точным является метод наибольшей вероятности. Он достаточно удачно выделяет леса с преобладанием ольхи, сады и посадки акации, насаждения березы возрастом до 15 лет, лиственные леса с преобладанием березы.

В) Менее надежным следует считать выделение следующих классов:

- лиственные леса с преобладанием дуба обычного и осины, которые иногда относятся к лесам с преобладанием березы;
- пожарища, не отличающиеся иногда от залежных земель;
- растительность пойм рек, которая местами не отличается от растительности залежных земель;
- садовая растительность, плохо отличающаяся от посадок акации (поэтому они были объединены в один класс).

Таким образом, полученные результаты классификации являются достаточно позитивными.

Для увеличения информативности классификации лесов ЗО целесообразно использовать вегетационные индексы, в первую очередь NDVI. Учитывая, что снимок, с которым мы работали, сделан в четырех спектральных каналах, логично предложить аналогичный NDVI нормированный вегетационный индекс, который учитывает спектральные яркости в средней инфракрасной (IR) и зеленой (GR) зонах. Индекс вычисляется по формуле:

$$I = (IR - GR)/(IR + GR) \quad (1)$$

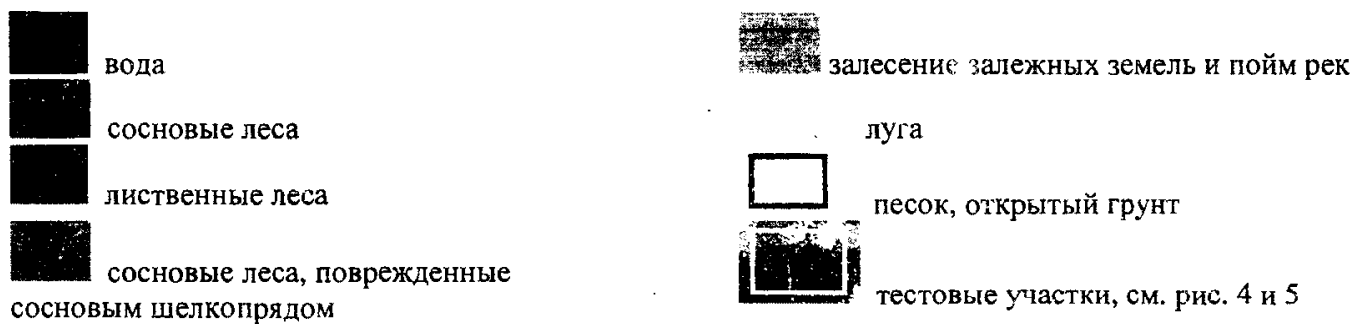
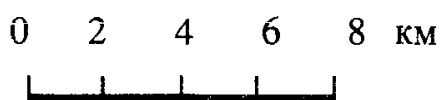
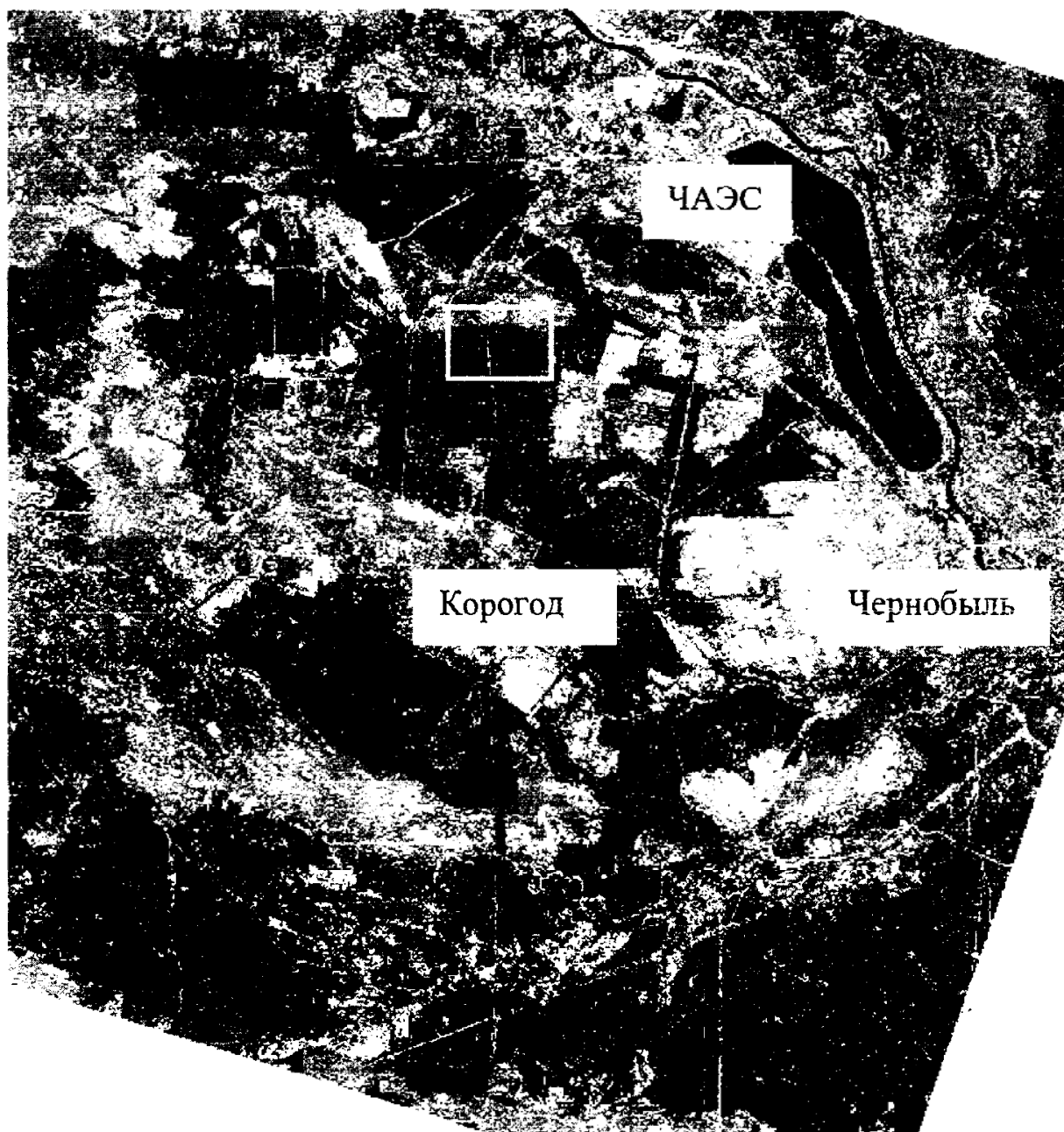


Рис. 1. Схема классификации растительности центральной части зоны отчуждения

Для оценки информационного потенциала индексов был построен график (рис. 2), на котором представлены 16 различных классов растительности и растительных ассоциаций. Основой для выделения отдельных классов были заверочные наземные данные. При вычислении индексов использовались модальные значения спектральных яркостей каждого из каналов.

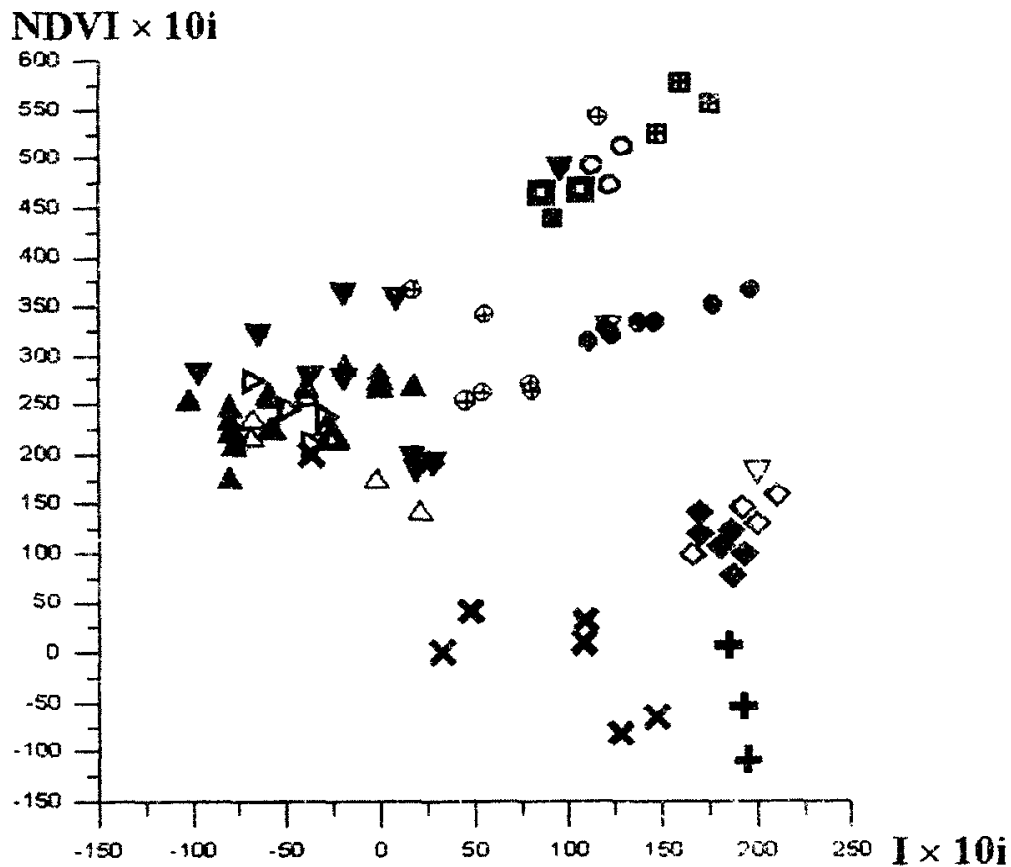
Анализ графика показывает, что из 16 классов, использованных для обучения, достаточно уверенно выделяются 8. Это следующие классы: сосновые леса; сосновые леса, поврежденные сосновым шелкопрядом; смешанные леса, которые состоят из сосновых и лиственных пород деревьев; смешанные лиственные леса с преобладанием дуба, берёзы, ольхи; природные и искусственные посадки березы; места пожарищ; растительность на залежных землях и в поймах рек.

Искусственные посадки и участки природной регенерации сосны возрастом менее 15 лет существенно отличаются от более старых сосновых лесов. Отмечается увеличение вегетационных индексов в ряду дуб — береза — акация. Участки сосновых лесов, поврежденные сосновым шелкопрядом, отчетливо отделяются от других классов сосновых древостоев. Участки пожарищ значительно лучше отличаются по вегетационным индексам, чем по абсолютным значениям спектральных яркостей.

Таким образом, проведенные исследования показали, что рассматриваемые вегетационные индексы дают полезную информацию, которая наряду со спектральными яркостями применима для классификации земных покровов.

Упомянутый подход был использован для определения фитосанитарного состояния сосновых лесов и природной пожароопасности территории ЗО. Экологическое состояние сосновых лесов Зоны помимо радионуклидного загрязнения, определяется также вредителями, в первую очередь сосновым шелкопрядом, корневой губкой и сменой гидрологического режима. Эти факторы отражаются на спектральных яркостях растительности и могут быть зафиксированы на космоснимках.

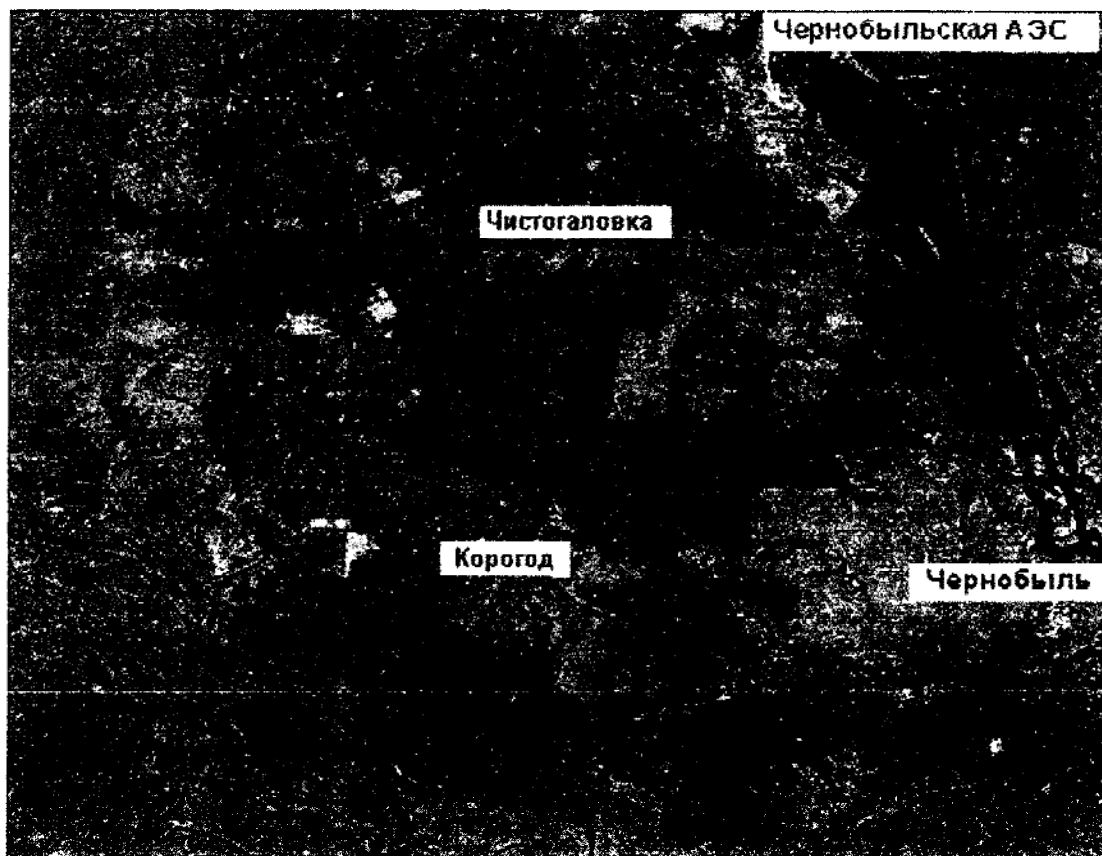
Для оценки природной пожароопасности растительного покрова в пределах Чернобыльской зоны был использован комбинированный трехслойный снимок. Этот искусственный снимок создан на основе использования индекса NDVI (в качестве первого слоя), который отражает состояние растительности и количество биомассы, значений интенсивности спектральной яркости в среднем инфракрасном канале снимка SPOT-4 (второй слой), которые отражают количество влаги в растениях, а также величин вышеуказанного вегетационного индекса I (третий слой).



- | | | | |
|---|--|---|--|
| △ | сосновые леса возрастом более 60 лет | ▲ | сосновые леса, возраст 30 – 60 лет |
| ▽ | сосновые леса возрастом 15–30 лет | ▽ | сосновые леса, моложе 15 лет |
| ▼ | леса, где сосна занимает 70–90 % состава | × | сосновые леса, поврежденные сосновым шелкопрядом |
| ▣ | леса с преобладанием ольхи | ■ | леса с преобладанием дуба |
| ○ | леса с преобладанием березы возрастом более 15 лет | ◻ | залесение залежных земель молодой березой возрастом менее 15 лет |
| ⊕ | смешанные сосново-лиственные леса | ● | смешанные лиственные леса |
| + | пожарища | ◇ | растительность залежных земель |
| ◆ | растительность пойменных земель | | |

Рис. 2. График распределения вегетационных индексов различных растительных сообществ зоны отчуждения

Классификация нового изображения позволила построить схему природной пожароопасности центральной части Чернобыльской ЗО, где ландшафты разделяются на три класса по степени природной пожароопасности. Леса, поврежденные сосновым шелкопрядом, наиболее сухие и пожароопасные. Площади, покрытые лиственными лесами, в первую очередь ольховыми, являются наименее опасными. Другие территории занимают промежуточное положение (рис. 3).



Степени пожароопасности









Сосновые леса	Лиственные леса	Залежные земли
 высокая		 высокая
 средняя		 средняя
 низкая	 низкая	
 Вода	 Песок и открытый грунт	

Рис. 3. Схема природной пожароопасности центральной части зоны отчуждения

Для улучшения тематической интерпретации космических изображений разработан новый подход по определению аналога позиции красного края (REP – red edge position) спектрометрической кривой [2, 6, 7–9], используя данные многозонального снимка в зеленом, красном и ближнем инфракрасном каналах. Аналог красного края определялся по 8 тестовым участкам для различных типов лесов со здоровой и поврежденной растительностью в пределах Зоны. Для оценки REP были использованы средние значения совокупности пикселей для каждого участка по каждому каналу. Результаты представлены в таблице 1.

Согласно представленным данным, значения REP для участков здорового соснового леса находятся в интервале от 722 до 725 нм, около 716 нм – для сосновых лесов, поврежденных вредителями, и около 707 нм – для сосновых лесов, сильно поврежденных шелкопрядом.

Зафиксированный “голубой сдвиг” подтверждает возможный потенциал аналога REP для определения фитосанитарных особенностей сосновых лесов.

Новый метод определения аналога REP, который разработан применительно к обработке данных снимка SPOT-4, позволяет создавать так называемые REP-изображения растительного покрова. Один из примеров REP-изображения показан на рисунках 4 и 5.

Таким образом, используя данные многозонального космического снимка, найден новый метод идентификации вегетационного стресса и мониторинга фитосанитарного состояния и пожароопасности сосновых лесов в пределах Чернобыльской ЗО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были решены различные методические вопросы, касающиеся определения радиоэкологических условий и классификации растительного покрова, используя данные многозональных космических снимков в пределах ЗО.

Сравнительный анализ изменений радиоэкологических условий в районе Чернобыльской АЭС за период 1984-1998 годов показал:

- станция оказывала влияние на экологию района и до аварии;
- наибольшее влияние радионуклиды оказали на сосновые леса, меньше они повлияли на лиственные леса и совсем незначительно на травянистую растительность;
- влияние последствий аварии на сосновые леса проявляется до настоящего времени;
- за прошедшие годы после аварии наблюдается постепенное самоочищение окружающей среды от радионуклидного загрязнения, но при этом уровень фона заметно повысился;
- даже низкие, меньше чем 10 Ки/км², содержания ¹³⁷Cs в почве оказывают влияние на спектральные яркости растительности и могут быть зафиксированы на многозональных космических снимках;

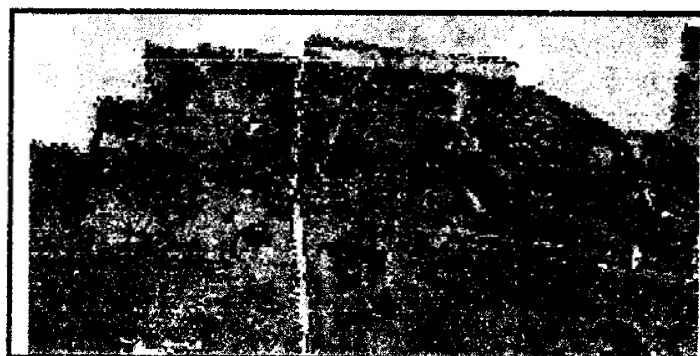
Таблица 1

Статистические характеристики значений интенсивности спектральных яркостей и значений позиции красного края для тест-участков в пределах зоны отчуждения (по данным снимка SPOT-4, 14.07.1998 г.)

№ п / п	Тип растительности	Значения интенсивности спектральной яркости по отдельным каналам, условных единиц*						Количество измерений	Аналог REP (нм)
		Gr (500–590 нм)		Red (610–680 нм)		NIR (790–890 нм)			
		сред.	станд. откл.	сред.	станд. откл.	сред.	станд. откл.		
1	Сосновые леса, возраст более 25 лет	54.33	1.48	38.86	2.02	68.10	8.10	6930	719
2	Сосновые леса, возраст 15–25 лет	57.33	2.16	43.22	3.10	69.37	6.30	693	719
3	Посадки сосны	64.16	1.46	49.60	1.87	97.29	3.24	129	725

4	Сосна в неблагоприятных условиях роста	55.38	3.27	41.63	4.56	59.84	8.41	667	716
5	Сосна, поврежденная корневой губкой	56.36	2.01	42.75	3.58	59.98	8.05	1492	716
6	Сосна, поврежденная сосновым шелкопрядом	58.62	1.78	48.49	2.65	49.93	5.06	1103	707
7	Регенерация сосны	66.57	2.99	56.81	4.21	81.17	9.58	3466	722
8	Смешанные сосновые и лиственные леса	52.53	1.36	35.33	1.42	101.83	13.45	1028	728

Примечание: * условные единицы интенсивности спектральной яркости космоснимка приведены в градациях от 0 до 255.



Условные обозначения для снимка залежные земли





-  сосна обычная, возраст 15–25 лет
-  сосна обычная, возраст более 30 лет
-  сосна поврежденная, начальная стадия
-  сосна поврежденная

Рис. 4. Фитосанитарное состояние тестового участка по данным классификации



Условные обозначения для снимка значение аналога REP более чем 728 нм







-  REP аналог от 725 до 728 нм
-  722–725 нм
-  719–722 нм
-  716–719 нм
-  713–715 нм
-  менее чем 713 нм

Рис. 5. REP-изображение тестового участка

— с точки зрения особенностей вегетационных циклов, наиболее оптимальным периодом многозональной космической съемки территории Зоны является конец мая–середина июля, при облачности менее 5 %;

— для классификации растительности по многозональным космическим снимкам с использованием программы ERDAS Imagine для ландшафтных условий ЗО наиболее пригодным является метод наибольшей вероятности (maximum likelihood). Этот метод дает наилучшее совпадение наземных контрольных точек с полученными по дистанционным материалам результатами;

предложен новый вегетационный индекс, информационный потенциал которого для улучшения результатов классификации демонстрируется на графике, где с его помощью различаются отдельные классы растительных сообществ;

– проведенные исследования позволили предложить новый методический подход для оценки фитосанитарного состояния лесов и их природной пожароопасности по материалам многозональной космической съемки;

– разработан новый подход для определения аналога позиции красного края (REP) спектрометрической кривой по данным многозонального космического снимка со спутника SPOT-4 в зеленом, красном и ближнем инфракрасном каналах. Таким образом, был найден новый методический подход для идентификации вегетационного стресса и мониторинга фитосанитарного состояния сосновых лесов в пределах Чернобыльской ЗО на основе использования снимков спутников SPOT-3/4;

– разработанные методы обработки многозональных космических снимков применимы для оценки влияния Чернобыльской катастрофы на экологические условия в различные периоды времени как в пределах Украины, так и в других странах Европы. Этот подход пригоден для контроля влияния атомных электростанций и захоронений радиоактивных отходов, а также влияния тепловых электростанций и других промышленных объектов на окружающую среду;

– использование дистанционных методов позволяет в десятки раз уменьшить расходы на проведение радиоэкологических исследований за счет сокращения объемов наземных работ, которые проводятся более целенаправленно и оперативно в пределах ограниченных территорий.

Таким образом, выполненные исследования дают детальную картину пространственного распределения разновидностей здоровых и поврежденных лесов в пределах Зоны, участков с различной степенью природной пожароопасности и позволяют обоснованно планировать лесотехнические работы и фитосанитарные мероприятия.

Результаты исследований на протяжении 1998-2002 гг. внедрены в практической работе ГСПКЛП «Чернобыльлес», ГП ЧенЦМИ, ГНПП «РАДЭК», ГСП «РУООД» и ГСНПП «Экоцентр». Они использовались для проведения весеннего (1999 г.) детального лесопатологического обследования древостоев на предмет выявления хвоелистогрызущих вредителей, для определения объемов работ по истреблению вредителей леса на протяжении 1999 года, а также для проведения предупредительных противопожарных мероприятий, упорядочения лесокультурных площадей в 1999-2002 гг. В дальнейшем они будут использоваться для ведения мониторинга леса в пределах ближней зоны ЧАЭС, для оценки радиационного состояния воздушного бассейна ближней зоны ЧАЭС в случае пожара, а также прогнозирования выноса радиоактивности в составе аэрозолей за ее пределы, при проведении научных исследований и планировании реабилитационных мероприятий в лесах Зоны в текущей работе вышеуказанных предприятий МЧС Украины.

Список литературы

1. Кронберг П. Изучение Земли из Космоса. М.: Мир, 1988. 350 с.
2. Лялько В.І., Азімов О.Т., Сахацький О.І., Ходоровський А.Я., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., Бідна С.М. Класифікація лісових масивів території Зони відчуження за типами рослинних угруповань за матеріалами багатозональної космічної зйомки / Тези доп. наук.-практ. конф. "Наука. Чорнобиль-98" (Київ, 1-2 квіт. 1999 р.). К.: ЄЦТБ, 1999. С. 88–89.
3. Лялько В.І., Сахацький О.І., Ходоровський А.Я., Азімов О.Т. Оцінка тенденцій зміни екологічного стану зони впливу аварії на ЧАЕС за різночасовими багатозональними космічними знімками / Тези доп. наук.-практ. конф. "Наука. Чорнобиль-97" (Київ, 11-12 лют. 1998 р.). К.: УРУЦ, 1998. С. 27–28.
4. Лялько В.І., Сахацький О.І., Ходоровський А.Я., Азімов О.Т. Застосування ГІС технологій для вивчення екології лісових масивів за багатозональними космічними знімками (на прикладі Зони відчуження ЧАЕС) / Матеріали конф. "ГІС Форум-99" (Київ, 10-12 листоп. 1999 р.). К.: ГІС-Асоц. України, 1999. С. 174–179.
5. Лялько В.І., Вульфсон Л.Д., Жарый В.Ю. и др. Аэрокосмические методы в геоэкологии. Киев: Наук. думка, 1992. 206 с.
6. Сахацький О.І., Лялько В.І., Ходоровський А.Я. та ін. Використання багатозональних космічних знімків з метою вивчення рослинності у зоні відчуження ЧАЕС / Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. К.: ЦАКДЗ ІГН НАНУ, 1999. С. 105–113.
7. Buschmann C. Fernerkundung von Pflanzen. *Naturwissenschaften*, 80, 1993, pp. 439–453.
8. Buschman C. and Nagel E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for the remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1993, pp. 711–722.
9. Dawson T.P. and Curran P.J. A new technique for interpolating the reflectance red edge position. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (11), 1998, pp. 2133–2139.
10. Lyalko V.I., Wolfson L.D., Hodorovsky A.Ya. et al. Remote sensing monitoring of plant vegetation and soil radioactive contamination by the aerosol transfer of radioactive nuclides expanding the influence of Chernobyl accident zone. In: *Proceedings of First International Conference on Remote Sensing*. Strasbourg, France, 1994, pp. 657–663.
11. Lyalko V.I., Djary V.Yu., Sakhatsky A.I. et al. Estimation of Heavy Metal and Radionuclide Contamination of the Soils and vegetation within the Chernobyl Danger Zone Using Remote sensing Data. In: *Proceedings of the XVIIIth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. Vienna, Austria, Vol. XXXI, Part B7, Commission VII, 1996, pp. 454–459.
12. Lyalko V.I., Sakhatsky A.I., Hodorovsky A.Ya. et al. Monitoring of Chernobyl disaster area using multitemporal satellite data. In: *International Archives of photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXII, Part 7, Budapest, 1998, pp. 726–730.

Статья поступила в редакцию 03.05.06