



УДК 91:004(043.3)



**Александра СКАЧКОВА**,  
аспирант кафедры почвоведения и земельных  
информационных систем географического  
факультета БГУ

**Дмитрий КУРЛОВИЧ**,  
доцент кафедры почвоведения и земельных  
информационных систем географического  
факультета БГУ,  
кандидат географических наук

## Пространственная структура и динамика природно-антропогенных ландшафтов Западно-Белорусской физико-географической провинции по данным дистанционного зондирования

Целью настоящих исследований явилось выявление структуры и динамики природно-антропогенных ландшафтов в пределах Западно-Белорусской физико-географической провинции на основе разновременных материалов многозональной космической съемки. Разработана методика автоматизированного дешифрирования структуры земельного фонда и выделения по ней природно-антропогенных ландшафтов (ПАЛ). В результате исследований установлено усложнение структуры земель внутри ландшафтных выделов за период с 1990 по 2010 гг., что проявилось в преобладании смешанных ПАЛ в пределах провинции

### Введение

Природно-антропогенные ландшафты (далее – ПАЛ) формируются в результате целенаправленного использования ресурсов природных комплексов в определенных видах хозяйственной деятельности [7]. Поэтому основой их выделения служит структура земельных угодий в пределах природных ландшафтов, являющаяся основным индикатором антропогенного воздействия. Целью настоящих исследований явилось выявление структуры и динамики ПАЛ в пределах Западно-Белорусской физико-географической провинции по разновременным многозональным данным дистанционного зондирования (далее – ДДЗ) в среде географических информационных систем (далее – ГИС). Следует отметить, что предварительно на ключевом участке «Западная Березина», расположенном в пределах провинции, была проведена серия опытно-методических работ по автоматизированному дешифрированию земель по ДДЗ [3, 4].

### Основная часть

Методы изучения ПАЛ аналогичны методам, позволяющим исследо-

вать природные комплексы. Среди них можно отметить экспедиционный, стационарный, картографический, дистанционный, а также метод анализа количественных характеристик ландшафтов. Вместе с тем, необходимо выделить специфический для антропогенного ландшафтоведения диахронический метод, заключающийся в изучении исторических срезов территории с целью определения тенденций развития ландшафтов за определенное время. В настоящем исследовании сделана попытка комбинирования дистанционного и диахронического методов. По серии разновременных многозональных ДДЗ в автоматизированном режиме определялась структура земельного фонда, служившая основой для типизации ПАЛ и выявления их динамики.

В качестве исходных данных были использованы материалы съемок спутников серии Landsat 5 TM. Их относят к среднемасштабным (пространственное разрешение каналов мультиспектрального сенсора – 30 м), изображения регистрируются в семи спектральных каналах от видимого синего до дальнего инфракрас-

ного диапазона длин волн. В целях сокращения этапов сбора и предварительной обработки материалов использованы данные архива Global Land Survey (снимки территории исследований на 1990, 2000, 2010 гг.). Это специально отобраные кадры с минимальным облачным покрытием и уровнем обработки 1G (выполнены геометрическая и радиометрическая коррекции). Поэтому предварительная обработка данных состояла в радиометрической калибровке снимков (пересчет значений яркости пикселей в физические величины яркости, регистрируемые сенсором) и маскировании облачности.

Автоматизированное дешифрирование видов земель по данным многозональных съемок является главной частью тематической обработки, так как позволяет определить структуру землепользования, и, следовательно, тип ПАЛ. Для этой задачи достаточно выявления таких видов земель, как пахотные и луговые, лесные и земли под болотами (таблица 1).

При формировании сигнатур в целях повышения качества дешифрирования были использованы дан-

Таблица 1 – Критерии выделения типов ПАЛ в Западно-Белорусской провинции по структуре земель [по 1 с доработкой]

Сельскохозяйственный класс ПАЛ

| Структура земель         | Типы ПАЛ     |                     |
|--------------------------|--------------|---------------------|
|                          | пахотные (1) | лугово-пахотные (2) |
| Пахотные и луговые земли | >70          | 50-70               |
| Лесные земли             | <20          | <20                 |
| Земли под болотами       | <10          | <40                 |

Сельскохозяйственно-лесной класс ПАЛ

| Структура земель         | Типы ПАЛ        |                           |                    |                           |
|--------------------------|-----------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|
|                          | лесополевые (3) | сенокосно-лесополевые (4) | пахотно-лесные (5) | пахотно-лесо-болотные (6) |
| Пахотные и луговые земли | >50             | 20-50                     | 20-50              | <20                       |
| Лесные земли             | 20-50           | 20-50                     | >50                | < 20                      |
| Земли под болотами       | <10             | <10                       | <10                | <80                       |

Лесной класс ПАЛ

| Структура земель         | Типы ПАЛ              |                  |
|--------------------------|-----------------------|------------------|
|                          | лесохозяйственные (7) | лесоболотные (8) |
| Пахотные и луговые земли | < 20                  | <20              |
| Лесные земли             | >70                   | > 70             |
| Земли под болотами       | < 10                  | >10              |

Таблица 2 – Значение дисперсии первых 4-х компонент для фрагмента снимка Landsat 5 TM от 30 мая 2010 г.

| Главные компоненты | Спектральные каналы Landsat 5 |               |             |             |               |               | Объем зеленой биомассы |       |       |       | Содержание влаги в растениях |       | Содержание влаги в почве |         |         | Нагрузки, % |
|--------------------|-------------------------------|---------------|-------------|-------------|---------------|---------------|------------------------|-------|-------|-------|------------------------------|-------|--------------------------|---------|---------|-------------|
|                    | band1 (Blue)                  | band2 (Green) | band3 (Red) | band4 (NIR) | band5 (SWIR1) | band7 (SWIR2) | VI                     | NDVI  | DVI   | RVI   | LMI                          | NDWI  | R/G                      | SWIR2/R | SWIR1/G |             |
| 1                  | -0,02                         | -0,03         | -0,04       | -0,02       | -0,11         | -0,10         | -0,15                  | 0,15  | 0,03  | 0,03  | -0,38                        | -0,26 | -0,21                    | -0,52   | -0,63   | 70          |
| 2                  | -0,02                         | -0,01         | -0,04       | 0,23        | 0,00          | -0,06         | -0,18                  | 0,40  | 0,27  | 0,27  | -0,42                        | -0,28 | -0,29                    | 0,25    | 0,44    | 24          |
| 3                  | 0,02                          | 0,03          | 0,02        | 0,12        | 0,03          | 0,08          | 0,30                   | -0,05 | 0,09  | 0,10  | -0,06                        | -0,11 | -0,09                    | 0,71    | -0,58   | 4           |
| 4                  | -0,07                         | -0,13         | -0,15       | -0,51       | -0,26         | -0,21         | -0,15                  | 0,18  | -0,32 | -0,35 | -0,02                        | 0,12  | -0,44                    | 0,29    | 0,03    | 2           |

ные наземных и лабораторных измерений спектральных характеристик (яркостей в отдельных спектральных диапазонах) различных типов земных покровов. Эти материалы получены в ходе работ на территории подспутникового полигона «Западная Березина» (Воложинский район), спектромертирование производилось аппаратурой, разработанной в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ [4].

Исходными материалами для дешифрирования на каждый временной интервал служили шесть спектраль-

ных каналов Landsat 5 TM (1-5 и 7) и четыре вегетационных индекса, рассчитанные на их основе. Вегетационные индексы были использованы для повышения точности распознавания переувлажненных почв и растительности (для разделения классов лугов и болот). Выбор вариантов синтеза был осуществлен с использованием метода главных компонент [5, 6]. Его суть заключается в выделении тех временных (вегетационных индексов), которые являются более информативными для дешифрирования различных видов земель и их состояний.

Анализ изображений по данному методу осуществлялся с помощью пакета статистического анализа R. Входные данные для анализа – спектральные каналы снимка и набор спектральных индексов, характеризующих объем зеленой биомассы (VI, RVI, DVI), содержание влаги в растительности (LMI, NDWI) и почвах (R/G, SWIR1/G и SWIR2/R). Результаты вычислений представлены в таблице 2.

*Продолжение следует*

Таблица 7 – Содержание химических элементов в почвах отдельных категорий земель тестового полигона, мг/кг

| Химический элемент | Земли сельскохозяйственного назначения |                  | Земли лесного фонда |                  |
|--------------------|----------------------------------------|------------------|---------------------|------------------|
|                    | х                                      | пределы вариации | х                   | пределы вариации |
| B                  | 28,5                                   | 10–50            | 23,0                | 20–50            |
| Ti                 | 2024,0                                 | 1000–5000        | 1875,0              | 1000–3000        |
| V                  | 53,3                                   | 10–100           | 66,0                | 50–100           |
| Cr                 | 52,0                                   | 10–100           | 48,0                | 20–70            |
| Mn                 | 591,0                                  | 200–2000         | 609,0               | 300–1500         |
| Co                 | 7,5                                    | н.о.–20          | 4,3                 | н.о.–10          |
| Ni                 | 17,0                                   | 5,0–50,0         | 16,6                | 10–30            |
| Cu                 | 18,0                                   | 10–50            | 13,6                | 10–30            |
| Zn                 | 48,3                                   | 15–100           | 45,0                | 30–70            |
| Ga                 | 7,0                                    | 2,0–30,0         | 7,2                 | 5,0–10,0         |
| Y                  | 32,8                                   | 5–70             | 29,0                | 10–50            |
| Zr                 | 278,0                                  | 70–700           | 444,0               | 200–700          |
| Nb                 | 9,6                                    | 3,0–20,0         | 9,3                 | 3,0–15,0         |
| Sn                 | 1,7                                    | н.о.–5,0         | 1,6                 | н.о.–3,0         |
| Yb                 | 2,0                                    | 1,0–5,0          | 2,1                 | 1,0–5,0          |
| Pb                 | 13,6                                   | 5,0–30,0         | 14,0                | 10–20            |

ющие около 65 % территории. Значительна также доля *озерно-болотного, камово-моренно-озерного, моренно-озерного* ландшафтов и ландшафта *нерасчлененных речных долин* [1].

Для сравнения отдельных родов ландшафтов по содержанию химических элементов в поверхностном горизонте почв был использован непараметрический дисперсионный анализ Краскела-Уоллиса (Kruskal-Wallis test). Результаты теста (таблица 3) свидетельствуют о статистически значимых различиях между родами ландшафтов по концентрации большинства анализируемых химических элементов (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Pb) в поверхностном горизонте почв. Наиболее контрастные различия между расположенными в северо-восточной части парка *камово-моренно-озерными* и *водно-ледниковым с озёрами* ландшафтами.

Результаты сопоставления геохимических характеристик почв, установленных для заповедной, регулируемого использования, охранной и рекреационной зон Национального парка «Нарочанский» (таблица 4), указывают на то, что в настоящее время содержание рассматриваемых микроэлементов в горизонте A<sub>1</sub> дерново-подзолистых почв различных функциональных зон практически не различается.

*Земли сельскохозяйственного назначения и земли лесного фонда (тес-*

*тов*ый полигон в Минской области).

Величина обменной кислотности почв изменяется от 3,10 до 7,58 при среднем значении (медиана) – 5,98. Данная величина имеет бимодальное распределение, что говорит, прежде всего, о неоднородности общей выборки: с одной стороны выделяется мода почв лесов, с другой – почв лугов и пашен (таблица 5). Наиболее кислыми в среднем являются почвы хвойных лесов (4,03), наименее (6,58) – почвы пашен, существенно измененных внесением удобрений и прочим агротехногенным воздействием.

Статистические характеристики содержания химических элементов в почвах тестового полигона представлены в таблице 6. При сопоставлении соответствующих средних величин с фоновыми показателями [2] установлено превышение фона для V, Cr, Mn, Ni, Cu, Yb в 1,7–6 раз, что может быть связано с проявлением как литологического фактора (почвообразующие породы), так и выраженного агротехногенного воздействия.

Данные, приведенные в таблице 7, свидетельствуют об отдельных различиях в среднем содержании ряда микроэлементов в почвах лесов, лугов и пашен. Достоверность различий между категориями земель по содержанию в почвах химических элементов оценивалась с помощью непараметрического U-критерия Манна-Уитни. Результаты теста свидетельствуют о

статистически значимом различии между категориями земель (сельскохозяйственного назначения, лесного фонда) по содержанию V (U=118, p=0,006), Zr (U=76, p<0,001) и Cu (U=123, p=0,014) в поверхностном горизонте почв.

#### Выводы

Таким образом, на основе проведенных исследований установлено следующее:

1. Пространственное распределение химических элементов в почвах Беларуси подчиняется общим закономерностям и частично характеризуется спецификой, обусловленной конкретным видом землепользования и локальными почвенно-геоморфологическими условиями исследуемой территории. Выявленная неоднородность естественного геохимического фона связана, в первую очередь, с латеральной неоднородностью ландшафтной сферы;

2. Статистически значимые различия содержания химических элементов в почвах различных категорий земель проявляются, в первую очередь, на землях сельскохозяйственного назначения и лесного фонда (содержание в поверхностном горизонте почв V, Zr и Cu);

3. На территории Минской области за пределами непосредственного влияния выбросов промышленных производств отмечены участки с по-



вышенным содержанием в почвах V, Cr, Mn, Ni, Cu, Yb, что может быть связано с проявлением как литологического фактора (почвообразующие породы), так и агротехногенного воздействия.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукашэў, О.В. Ландшафтно-геохимические особенности национального парка «Нарочанский» / О.В. Лукашэў, Н.В. Жуковская, Н.Г. Лукашэва [и др.] // Природопользование. – 2008. – № 14. – С. 48-53.
2. Лукашев, О.В. Фоновое содержание химических элементов в почвах и растительности особо охраняемых природных территорий Белорусского Поозерья / О.В. Лукашэў, Н.В. Жуковская, Н.Г. Лукашэва, С.В. Савченко // Природопользование. – 2009. – Вып. 16. – С. 57-62.
3. Отчет о научно-исследовательской работе «Провести геохимические исследования почв земель сельскохозяйственного и природоохранного назначения территории Минской области Республики Беларусь применительно к оценке степени техногенного воздействия на них и составлению геохимического атласа» / С.И. Кузьмин, О.В. Лукашэў, Н.Г. Лукашэва. – Минск: БГУ [б.н.], 2013.
4. Шиманович, В.М., Акудович С. А. К методике расчета средних значений микро-элементов для выборок, усеченных нижним пределом обнаружения / В.М. Шиманович, С.А. Акудович // Літасфера. – 2000. – № 13. – С. 144-147.

Поступление в редакцию 9.07.2014

**O. LUKASHEV,  
S. KUZ'MIN,  
N. ZHUKOVSKAYA,  
N. LUKASHEVA**

#### THE SPATIAL DISTRIBUTION OF METALS IN SOILS OF THE DIFFERENT LANDCATEGORIES IN BELARUS

The article considers the spatial distribution of the chemical elements in soils of the different landcategories in Belarus: national park «Narochanski» and adjacent areas case study. It has been shown that on the one hand the distribution of chemical elements in soil follows the regional general laws. From the other hand it has peculiarities due to specific land use and soil and geomorphological conditions. ■



**Александра СКАЧКОВА**,  
аспирант кафедры почвоведения  
и земельных информационных систем  
географического факультета БГУ  
**Дмитрий КУРЛОВИЧ**,  
доцент кафедры почвоведения  
и земельных информационных систем  
географического факультета БГУ,  
кандидат географических наук



## Пространственная структура и динамика природно- антропогенных ландшафтов Западно-Белорусской физико-географической провинции по данным дистанционного зондирования

(Окончание. Начало в № 1, 2014)

Анализ изображений по данному методу осуществлялся с помощью пакета статистического анализа R. Входные данные для анализа – спектральные каналы снимка и набор спектральных индексов, характеризующих объем зеленой биомассы (VI, RVI, DVI), содержание влаги в растительности (LMI, NDWI) и почве (R/G, SWIR1/G и SWIR2/R). Результаты вычислений представлены в таблице 2 (см. с. 48 в «Земля Беларуси», № 1, 2014) и на рисунке 1.

В данном примере первые четыре компоненты описывают практически весь диапазон данных, вклад же остальных оказывается ничтожно мал: так, нагрузка на первые четыре компоненты составляет почти 100 % (таблица 2, колонка «Нагрузки, %»), это же иллюстрирует рисунок 1: уже в четвертой компоненте уровень шума нарастает. Поэтому поиск наиболее

значимых индексов производится в пределах этих компонент.

Первая компонента определяется двумя группами индексов: описывающими содержание влаги в почве и объем зеленой биомассы. Значительно влияют на дисперсию во второй компоненте индексы, характеризующие содержание влаги в растениях (наибольшие значения дисперсий выделены в таблице жирным шрифтом, второстепенные – курсивом).

В результате для использования в качестве дополнительных параметров при автоматизированном дешифрировании были выбраны индексы, с наибольшим разнообразием описывающие состояние растительности и почв:

*SWIR1/Green* – описывает различные типы растительности, водные объекты, заболоченные земли;

*SWIR2/Red* – описывает антропо-



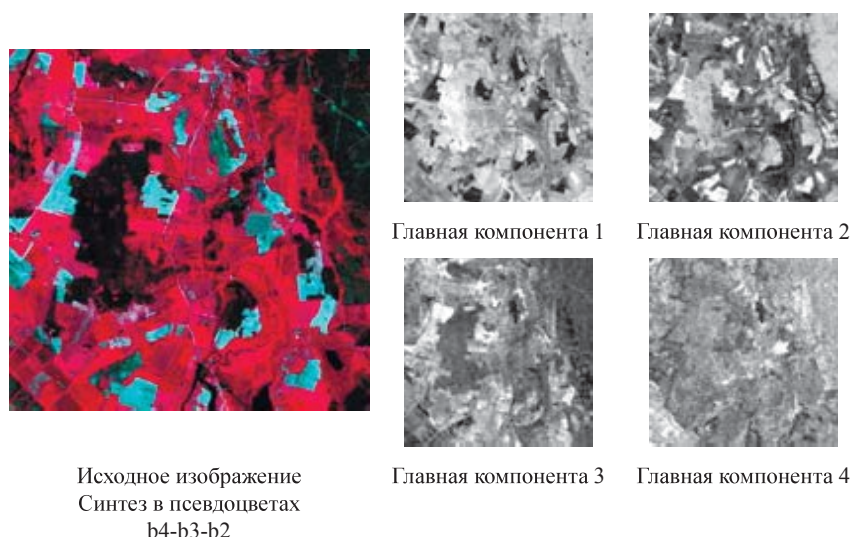


Рисунок 1 – Представление исходного изображения в четырех главных компонентах

генные объекты;

$RVI = NIR - Red$  – описывает типы растительности с различной фитомассой;

$LMI = SWIR1 / NIR$  – описывает содержание влаги в зеленой биомассе.

Далее изображение, состоящее из шести каналов исходного снимка и четырех выбранных индексов, классифицировалось в ПО Multispec по методу максимального правдоподобия.

Для проверки работоспособности методики применялась оценка точности дешифрирования с помощью матрицы ошибок: сравнивались результаты дешифрирования фрагмента

снимка на территорию подспутникового полигона «Западная Березина» с использованием индексных изображений и без них. На данный ключевой участок имелась векторная карта видов и подвидов земель, выполненная по результатам визуальной интерпретации материалов аэрофотосъемки и их полевой верификации [4]. Результаты оценки показали, что точность дешифрирования по описанной выше методике составила 75 %. Точность дешифрирования по набору данных без использования индексов составила менее 70 % (точность определения класса болот меньше на 10 %). Таким образом, представленная методика

позволяет повысить достоверность распознавания земель путем использования вегетационных индексов наравне со спектральными каналами снимка.

После выполнения автоматизированного дешифрирования задача выделения ПАЛ сводилась к вычислению площадей видов земель в пределах родов природных ландшафтов (рисунок 2). Эти шаги выполнялись стандартными средствами ГИС. На различных этапах были использованы ГИС GRASS и Quantum GIS.

Первый шаг – преобразование результатов дешифрирования в векторный вид. Для этого выполнена растровая генерализация, результат которой конвертировался в вектор. При этом в таблице атрибутов итогового векторного слоя был сохранен номер вида земель, к которому была отнесена группа пикселей при дешифрировании.

На втором шаге для подсчета долей различных видов земель в пределах родов ландшафтов выполнялось пересечение слоя результатов классификации со слоем родов природных ландшафтов и вычислялись значения площадей каждого вида земель в пределах контура.

Третий шаг – непосредственно назначение типов ПАЛ – осуществлялось на основе соотношения площадей различных видов земель (таблица 1) внутри каждого рода природного ландшафта [1]. Структура ПАЛ на 1990, 2000 и 2010 гг. пред-

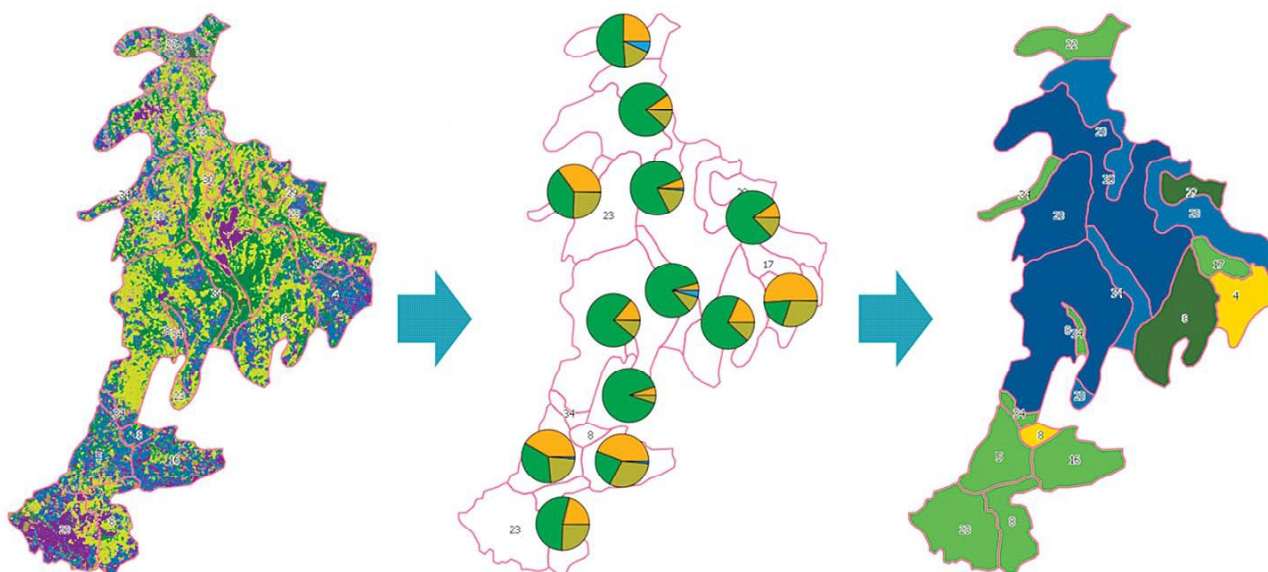


Рисунок 2 – Схема выделения ПАЛ по результатам дешифрирования видов земель

| Природно-антропогенный ландшафт |                        | Год   |       |       |
|---------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|
| Класс                           | Тип                    | 1990  | 2000  | 2010  |
| Сельскохозяйственные            | Пахотные               | 15,2% | 5,7%  | 0,5%  |
|                                 | Лугово-пахотные        | 11,5% | 3,4%  | 3,1%  |
| Сельскохозяйственно-лесные      | Лесопольевые           | 13,2% | 23,6% | 29,8% |
|                                 | Сенокосно-лесопольевые | 47,5% | 53,6% | 47,5% |
|                                 | Пахотно-лесные         | 7,8%  | 13,2% | 3,5%  |
|                                 | Пахотно-лесо-болотные  | 4,8%  | 0,1%  | 0,6%  |
| Лесные                          | Лесохозяйственные      | -     | 0,4%  | 8,4%  |
|                                 | Лесоболотные           | -     | -     | 6,6%  |

**Высотные ступени ландшафтов**

- Возвышенные
- Средневысотные
- Низменные

**Типы ПАЛ**

- СХ - Пахотные
- СХ - Лугово-пахотные
- СХ-Л - Лесополосные
- СХ-Л - Сенокосно-лесополосные
- СХ-Л - Пахотно-лесные
- СХ-Л - Пахотно-лесо-болотные
- Л - Лесохозяйственные
- Л - Лесоболотные

Гродно, Минск

0 25 50 75 100 км

**Тысяч гектар**

Сельскохозяйственные - Пахотные  
Сельскохозяйственные - Лугово-пахотные  
Сельскохозяйственные - Сенокосно-лугосеменные  
Сельскохозяйственно-лесные - Лесополосные  
Сельскохозяйственно-лесные - Сенокосно-лесополосные  
Сельскохозяйственно-лесные - Пахотно-лесные

Холмисто-моренно-озерные  
Камово-моренные  
Моренно-озерные  
Вторично-моренные  
Моренно-западные  
Водно-ледниковые  
Озёрно-ледниковые  
Аллювиальные  
Озёрно-аллювиальные  
Озёрно-болотные  
Пойменные  
Речные долины

45



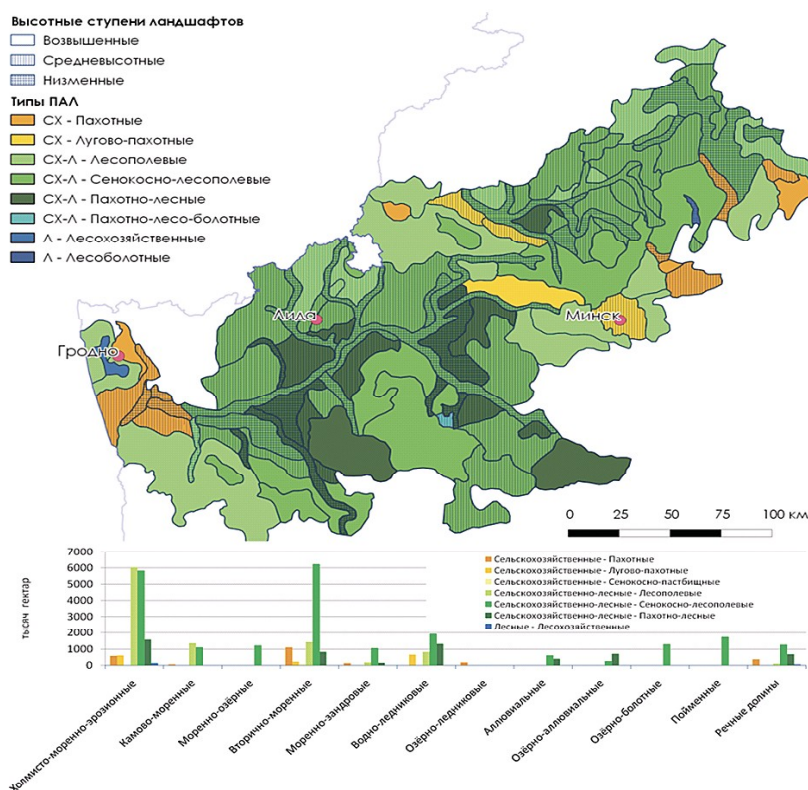


Рисунок 4 – Структура ПАЛ в 2000 г.

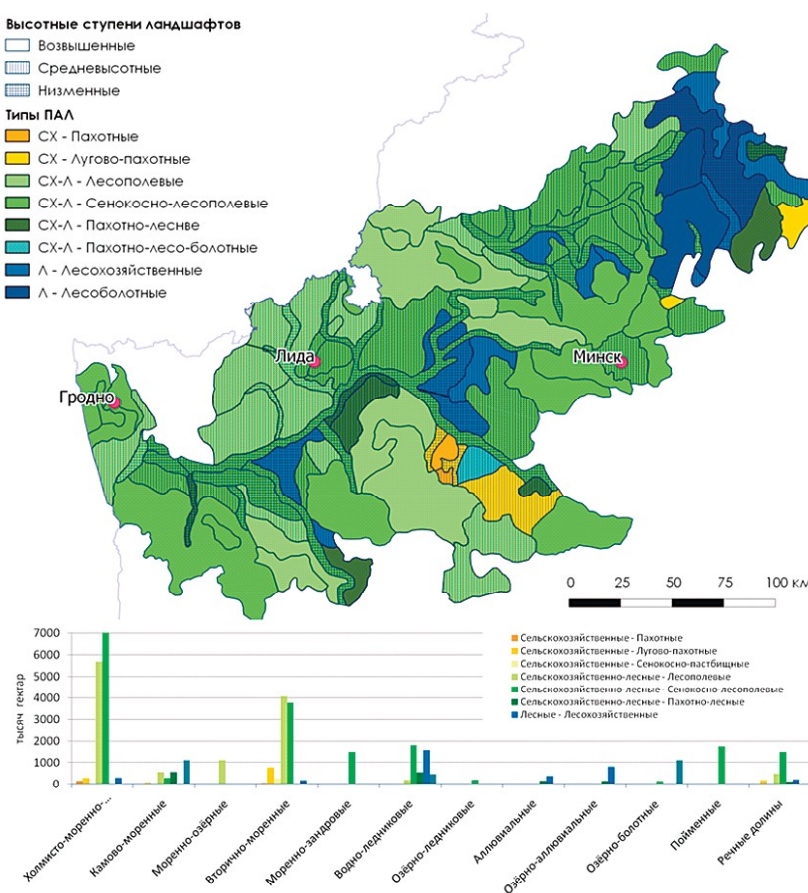


Рисунок 5 – Структура ПАЛ в 2010 г.

Наиболее было распространено смешанное использование ландшафтов: в 2000 г. более половины площади провинции занимали сенокосно-лесополосные, немногим меньше четверти – лесополосные. В силу большой площади, которую они занимали, наибольшая их доля приходилась на самые распространенные в провинции природные ландшафты – холмисто-моренно-эрозионные и вторично-моренные.

Следует отметить тенденцию к увеличению площади лесов и, как следствие, появление в структуре ПАЛ класса лесных ландшафтов (тип лесохозяйственные, были распространены в пределах холмисто-моренно-эрозионных ландшафтов и на речных долинах).

Отмеченные в 2000 г. тенденции сохраняются в структуре ПАЛ и к 2010 г.: доля сельскохозяйственных ландшафтов падает до 3,1 %. Такое направление использования земель сохраняется в пределах вторично-моренных и холмисто-моренно-эрозионных природных ландшафтов (Копыльская гряда, Новогрудская возвышенность). Доля смешанных ПАЛ остается практически неизменной и тяготеет к тем же родам природных ландшафтов (таблица 3). Доли различных типов ПАЛ от общей площади провинции (таблица 3).

Значительно возрастает доля лесохозяйственных ПАЛ. Они распространены в пределах водно-ледниковых равнин, аллювиальных и озёрно-аллювиальных низин (рисунок 5). Крупный массив лесоболотных ландшафтов соответствует территории Березинского биосферного заповедника.

Таким образом, в структуре ПАЛ на протяжении всего рассматриваемого периода господствуют сельскохозяйственно-лесные ПАЛ, занимающие почти половину территории, а в их составе – сенокосно-лесополосные (таблица 3). Доля сельскохозяйственных ландшафтов за период с 1990 г. по 2010 г. значительно уменьшается, и среди них вместо пахотных начинают преобладать лугово-пахотные. Исходя из этого, можно говорить об усложнении пространственной структуры внутри ландшафтных выделов, то есть увеличении доли ПАЛ со смешанной структурой угодий в общей площади провинции.