DOI 10.21178/2079-6080.2021.2.39
УДК 577.4+630*5

Анализ динамики землепользования на урбанизированной территории с использованием материалов дистанционного зондирования земли, ГИС-технологий и математического моделирования

© Чонг Тай Нгуен, Тхань Куэт Фан, А.С. Алексеев,
Д.М. Черниковский, А.В. Любимов, В.Л. Сергеева

Analysis of land use dynamics in urbanized area using remote sensing materials, GIS-technologies and mathematical modeling

Trong Tai Nguyen, Thanh Quyet Phan, A.S. Alekseev, D.M. Chernikhovskii, A.V. Lyubimov, V.L. Sergeeva (St. Petersburg State Forest Technical University of S.M. Kirov)

Remote sensing technology combines well-known geographic information systems (GIS) with the benefits of functions such as management, spatial data analysis and display of results; with which you can view and evaluate past data fields. Remote sensing image processing used to investigate and assess changes in forest resources will provide fast and accurate results. Based on the collection of geographic data, attributes and the use of round trip remote sensing capabilities to efficiently collect, analyze and use information. Research data collected from these various sources include remote sensing data, field survey data (GPS sampling machines and field surveys), and statistical statistics (statistical reports from relevant agencies). The study carried out statistics on the area of each group of used land. Between 2001 and 2018, the structure of land uses changed significantly, mainly due to two groups of forest land and agricultural land. Forest area declined sharply in 2018 compared to 2001, while agricultural and anthropogenic land areas tended to increase between 2001 and 2018. Landsat satellite imagery classifica-

tion results showed a very good classification accuracy of 97 %. The field validation process has high reliability and the benefits of using remote sensing to classify and assess land-use change. The results of the study are also the basis for the development of maps of fluctuations in the landscape of the study area. The matrix model has been proposed to analyze the dynamics of the study area land-use classes, the analysis of the balance of classes area was done and a matrix of transition probabilities was developed. The forecast of land distribution by land use classes for the year 2035 is made.

Keywords: geographic information systems, remote sensing data, automated classification, class of land use, matrix model

Анализ динамики землепользования на урбанизированной территории с использованием материалов дистанционного зондирования земли, ГИС-технологий и математического моделирования

Чонг Тай Нгуен, Тхань Куэт Фан, А.С. Алексеев, Д.М. Черниковский, А.В. Любимов, В.Л. Сергеева

Современные дистанционные методы изучения природных ресурсов совместно с ГИС-технологиями позволяют эффективно выполнять ряд операций по управлению и обработке пространственных данных о лесах, изучать динамику земель. Научной основой для проведения исследования является концепция лесного морфологического ландшафтоведения, предполагающая активное использование всей совокупности ландшафтных источников информации.

Основной целью исследования являлась разработка и апробация методики для изучения динамики классов землепользования на основе материалов космической съемки и современных средств ГИС-технологий.

Объектом исследования выбрана северная часть Лисинского научно-исследовательского и учебного полигона на территории Ленинградской области. На основе анализа имеющихся материалов, данных полевых обследований и космической съемки было выделено пять основных классов землепользования. Выполнена автоматизированная классификация космических снимков Landsat 2001 и 2018 гг. на изучаемую территорию методом максимального правдоподобия. Статистика Каппа составила 0,98 для снимка 2001 г. и 0,97 для снимка 2018 г. Выборочная наземная верификация подтвердила соответствие результатов классификации истинным классам землепользования. Оценены изменения площадей каждого класса. За изучаемый период времени структура классов землепользования изменилась преимущественно за счет увеличения доли земель населенных пунктов и земель сельскохозяйственного назначения. Площадь лесных насаждений к 2018 году существенно сократилась. Предложена матричная модель для анализа динамики площадей изучаемой территории по классам землепользования, проведен анализ баланса площадей по классам и построена матрица вероятностей перехода земель из одной категории в другую. Сделан прогноз распределения земель по классам землепользования на 2035 год.

Полученные результаты важны для изучения ландшафтной основы территории Лисинского научно-исследовательского и учебного полигона. Также результаты исследования могут использоваться в качестве основы при разработке карт динамики площадей по классам и видам землепользования для исследуемой территории.

Ключевые слова: географические информационные системы, материалы дистанционного зондирования, автоматизированная классификация, класс землепользования, матричная модель

Нгуен Чонг Тай — аспирант кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем

Фан Тхань Куэт — аспирант кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем

Алексеев Александр Сергеевич — д-р геогр. наук, проф., зав. каф. лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем

E-mail: a_s_alekseev@mail.ru

Черниковский Дмитрий Михайлович — канд. с.-х наук, доцент каф. лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем

E-mail: cherndm2006@yandex.ru

Любимов Александр Владимирович — д-р с.-х. наук, проф. каф. лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем

Сергеева Валерия Лейзеровна — канд. биол. наук, доц. каф. лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5

Телефон: 8 (812) 670—93—16; 8 (812) 670—93—11

E-mail: ltlg@spbftu.ru

Введение

В настоящее время в лесном хозяйстве активно используются географические информационные системы (ГИС) и геоинформационные технологии (ГИС-технологии). ГИС-технологии применяются при систематическом обновлении информационной базы лесного фонда, ведении лесного реестра, организации мониторинга, при контроле лесоэксплуатации [1, 3, 5, 7–10].

Научной основой для проведения исследования является концепция лесного морфологического ландшафтоведения с методами ландшафтно-морфологического анализа лесов, разработанная профессором СПбГЛТУ Д.М. Киреевым. Данная концепция активно использует совокупность всех ландшафтных источников информации: дистанционные снимки, общегеографические, тематические карты и индикационные взаимосвязи. Концепция предусматривает логическую последовательность семи этапов ландшафтно-морфологического анализа лесов, позволяющих максимально сократить дорогостоящие полевые работы. Ландшафтная интерпретация этих источников на подготовительном (дополном) этапе работ существенно повышает достоверность и производительность анализа и картографирования лесной территории [4].

В последние годы состояние лесных ресурсов демонстрирует признаки ухудшения вследствие воздействия таких причин, как стихийные бедствия, неблагоприятные изменения окружающей среды и антропогенные воздействия, тем самым создавая серьезную проблему для эффективного и устойчивого управления лесными ресурсами. Между тем, современные дистанционные методы изучения природных ресурсов совместно с ГИС-технологиями позволяют эффективно выполнять ряд операций по управлению и обработке пространственных данных о лесах, изучать динамику земель [12, 13]. В настоящее время совместное применение дистанционных методов и ГИС-технологий широко используется при решении многочисленных практиче-

ских задач в различных областях, таких как геологические исследования [11], управление природными ресурсами [16], текущее картирование землепользования [15] и др. Современные методы сбора, анализа и обработки материалов дистанционного зондирования, применяемые при изучении характеристик лесов и оценке их состояния, позволяют получать оперативные и точные результаты.

Основной целью исследования являлась разработка и апробация методики для изучения динамики классов землепользования на основе материалов космической съемки, современных ГИС-технологий и методов математического моделирования. В число конкретных задач входили: разработка методического подхода для изучения динамики классов землепользования, выбор программного обеспечения, подготовка исходных материалов для проведения исследования на модельной территории, получение материалов дистанционного зондирования, проведение автоматизированной классификации с оценкой точности, анализ полученных расхождений. Кроме этого, был рассмотрен баланс площадей изучаемой территории по классам землепользования, построена матричная модель их динамики и сделан прогноз на 2035 год.

Объект и методика исследования

Объектом исследования выбрана северная часть Лисинского научно-исследовательского и учебного полигона Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. Эта территория относится к Ижорскому и Лужско-Тосненскому ландшафтам, ее площадь составляет 39700 га, протяжённость с запада на восток – 14,3 км, с севера на юг – 27,8 км [6]. В состав объекта входят части Любанского, Лисинского учебно-опытного и Гатчинского лесничеств Ленинградской области. Большую часть территории занимают земли лесного фонда и сельскохозяйственного назначения. Также представлены земли населенных пунктов. С помощью программы Google Earth сформиро-

ван векторный слой границ изучаемой территории. Для верификации результатов классификации космических снимков заложен набор наземных точек (рис. 1).

Рис. 1. Границы изучаемой территории на космическом снимке и расположение наземных точек для верификации

Исходными материалами для проведения исследования служили данные дистанционного зондирования (космические снимки Landsat 7 и Landsat 8), результаты полевых работ (координаты точек для верификации, определенные средствами GPS) и статистические сведения (отчеты профильных ведомств). Для поиска и получения спутниковых изображений Landsat использовался сайт United States Geological Survey (USGS). EarthExplorer <https://earthexplorer.usgs.gov/> [17]. Пространственный анализ проводился с помощью программного обеспечения ArcGIS Desktop 10.1 и ENVI 4.7 [14].

Для изучения динамики землепользования Лисинского научно-исследовательского и учебного полигона были выполнены следующие шаги:

- предварительная подготовка спутниковых снимков с использованием программного обеспечения ENVI 4.7 (радиометрическая и геометрическая коррекции изображений);
- выбор тренировочных участков на снимках с оценкой спектральной различимости;
- проведение автоматизированной классификации с оценкой точности;
- наземная (полевая) верификация результатов классификации;
- оценка динамики классов землепользования.

При выборе тренировочных участков руководствовались критериями однородности спектральных характеристик разных классов. Различимость спектральных характеристик тренировочных участков по классам оценивалась на основе расстояния Джеффриса-Матуситы, которое равно 2 в случае, если спектральные классы полностью отличаются, и стремится к 0, когда они идентичны.

Для проведения классификации материалов дистанционного зондирования применялся метод контролируемой классификации, предложенный Дариусом и Джастином, с использованием алгоритма максимального правдоподобия. При формировании набора тренировочных данных использовалось сочетание результатов полевых обследований с материалами спутниковых изображений [14].

Оценка точности результатов классификации спутниковых снимков выполнялась с помощью построения и анализа матрицы ошибок. При проведении автоматизированной классификации важно как число пикселей-образцов, так и их расположение на снимке. Также имеет значение время сбора информации, поскольку спектральные характеристики изучаемых объектов в течение года могут значительно изменяться. Одной из основных характеристик качества классификации является ее достоверность, определяемая как частное от деления суммы

правильно определенных пикселей, расположенных по диагонали матрицы, на общее число пикселей, используемых при выборе тренировочных участков. Но на самом деле это число может быть случайным. Чтобы исключить фактор случайности при обобщении полученных результатов используют индекс Каппа Коэна — *KHAT*, который определяется по формуле:

$$KHAT = \frac{d - q}{N - q},$$

где N — общее число пикселей тренировочных участков;

d — число правильно классифицированных пикселей (сумма пикселей, находящихся на диагонали матрицы ошибок);

q — число случайных результатов, вычисляемое через суммы пикселей в столбцах n_c и в строках матрицы ошибок n_r):

$$q = \sum_{i=1}^N n_c n_r / N.$$

Для сравнительного анализа результатов классификации за разные годы использовали ГИС-функции преобразования растровых данных в векторные и пересечения векторных слоёв. После преобразования растровых результатов классификации в векторные полигоны появляется возможность детального рассмотрения каждого отдельного участка с учетом его расположения и геометрических характеристик. Функция пересечения векторных слоев позволяет выявлять и оценивать изменения за изучаемый период, а также строить карты динамики землепользования. Общий порядок действий по проведению исследования отражен на рисунке 2.

Анализ изменений площадей земель по 5 классам землепользования произведен с помощью специальной матричной модели [2], базирующейся на балансе площадей земель по категориям, который в смежные моменты времени имеет следующий вид:

$$S_j(t+1) = S_j(t) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n S_{ij}(t) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n S_{ji}(t),$$

где $S_j(t)$ — площадь земель, находящихся в момент времени t в j -ом классе землепользования;

$j = 1, \dots, n$, где n — число различных классов, в нашем случае $n = 5$;

$S_{ij}(t)$ — площадь переместившихся из класса i в класс j к моменту времени $t+1$.

Введем обозначение:

$$S_{jj}(t) = S_j(t) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n S_{ji}(t),$$

где $S_{jj}(t)$ — площадь земель класса j , не изменивших его к моменту времени $t+1$, тогда балансовое соотношение примет следующий вид:

$$S_j(t+1) = \sum_{i=1}^n S_{ij}(t).$$

Баланс площадей по классам землепользования позволяет оценить вероятности перехода земель из одного класса в другой. Пусть p_{ij} — вероятность перехода единицы площади из класса i в класс j , тогда баланс площадей примет следующий вид:

$$S_j(t+1) = \sum_{i=1}^n S_i(t) * p_{ij}, \quad j = 1, \dots, n$$

или в векторно-матричных обозначениях:

$$S(t+1) = S(t) * P$$

Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^n p_{ij} = 1.$$

распределение в любой последующий момент времени:

$$S(t) = S(0) * P^t$$

Таким образом, если известна матрица P , и есть основания полагать, что она не изменяется во времени, и вектор $S(0)$ – распределение площадей изучаемой территории по классам землепользования в начальный момент времени, то можно определить такое

Элементы матрицы P имеют самостоятельное значение, так как характеризуют вероятности осуществления соответствующих переходов земель из одного класса в другие.

Рис. 2. Схема разработки карты динамики классов землепользования за период 2001–2018 гг.

Результаты и их обсуждение

Для проведения исследования получены две сцены космической съемки Landsat, выполненной в вегетационный период 2001 и

2018 гг. (табл. 1). С помощью векторного слоя с границами области исследования (см. рис. 1) из исходных сцен Landsat были вырезаны фрагменты для дальнейшей обработки.

Таблица 1

Краткая характеристика спутниковых изображений Landsat

Дата съёмки	Номер сцены	Спектральные каналы	Разрешение, м на один пиксель	Наименование спутника
17.07.2001	LE71840182001198KIS00	Red, Green, Blue	30	Lansat 7
09.08.2018	LC81840182018221LGN00	Red, Green, Blue	30	Lansat 8

На основе анализа материалов Лисинского научно-исследовательского и учебного полигона, проведенных полевых обследований и просмотра материалов космической съемки был сформирован набор основных классов землепользования, представляющих интерес

для ландшафтно-морфологического анализа (табл. 2). Поскольку авторы не располагали официальными данными о точных границах участков, категориях и видах землепользования, рассматриваемые классы выделены условно и в значительной степени обобщены.

Таблица 2

Классы землепользования

Класс землепользования	Изображение на снимке Landsat	Фото
Высокопродуктивные лесные насаждения (лес «А»)
Низкопродуктивные лесные насаждения (лес «Б»)
Земли сельскохозяйственного назначения

Класс землепользования	Изображение на снимке Landsat	Фото
Земли населенных пунктов
Болота

Для оценки динамики землепользования на изучаемой территории выделены следующие классы:

- высокопродуктивные лесные насаждения (лес «А») с запасами спелых древостоев 100 м³/га и более;
- низкопродуктивные лесные насаждения (лес «Б») с запасами спелых древостоев менее 100 м³/га;
- земли сельскохозяйственного назначения, в том числе пашни и сенокосы;
- земли населенных пунктов, в том числе пути сообщения;
- болота.

В программе ENVI были сформированы наборы тренировочных участков для выбранных классов. Далее была проведена оценка их спектральной различимости, которая показала хорошие результаты — значения критерия Джеффриса-Матуситы в большинстве случаев находились в диапазоне от 1,9 до 2,0.

Далее на основе выбранных тренировочных участков была проведена классификация космических снимков методом максимального правдоподобия. Итоговые характеристики качества классификации — общая точность и статистика Каппа-Коэна продемонстрировали практически полную степень согласия между результатами (статистика

Каппа для результатов классификации снимка 2001 г. составила 0,98, для снимка 2018 г. — 0,97).

Для верификации результатов классификации было выбрано 12 наземных точек обследования, 8 из которых расположены в пределах границ изучаемой территории (см. рис. 1). Во всех случаях отмечено соответствие истинных классов землепользования, определенных в результате верификации, классам, полученным в результате классификации снимков Landsat.

При практической реализации предложенного подхода возможна детализация причин расхождений путем преобразования результатов классификаций за разные годы в векторный формат с последующим анализом. В программе ENVI данная процедура выполнялась путем ряда последовательных действий:

- преобразование результатов классификаций в векторный формат;
- формирование карты динамики классов путем совмещения двух векторных карт с результатами классификации;
- анализ атрибутивной информации в табличной форме.

Карта динамики площадей землепользования по классам представлена на рисунке 3.

Рис. 3. Карта динамики площадей землепользования по классам за период 2001–2018 гг.

На карте показаны цветом все переходы земель за 2001–2018 годы из одного класса землепользования в другие, а также земли, не изменившие своего состояния. Всего в анализ включено 5 классов земель, поэтому полное число переходов равно 20, что соответствует числу цветов в легенде карты (плюс 1 цвет для земель без изменений).

Атрибутивная информация в табличной форме, сформированная изначально в среде ГИС, далее экспортировалась в MS Excel для последующего анализа. Анализ баланса площадей по классам землепользования в 2001 и 2018 годах показал, что в структуре землепользования на изучаемой территории за 17 лет произошли существенные изменения (табл. 3).

Таблица 3

Баланс площадей изучаемой территории
по классам землепользования в 2001 и 2018 годах

		Площади по классам землепользования в 2001 году, га					
		Земли сельскохозяйственного назначения	Земли населенных пунктов	Высокопродуктивные леса	Низкопродуктивные леса	Болота	Всего
Площади по классам землепользования в 2018 году, га	Земли сельскохозяйственного назначения	7818	0	118	832	190	8959
	Земли населенных пунктов	509	4369	305	541	30	5754
	Высокопродуктивные леса	0	0	13174	0	0	13174
	Низкопродуктивные леса	21	0	242	7998	68	8330
	Болота	82	0	0	664	2737	3483
Всего		8430	4369	13840	10036	3025	39700

Земли сельскохозяйственного назначения (всего 612 га) перешли в состав населенных пунктов – 509 га, заросли низкопродуктивными лесами – 21 га и заболотились – 82 га. Одновременно к землям сельскохозяйственного назначения перешли высокопродуктивные и низкопродуктивные леса площадью 118 и 832 га, соответственно, а также болота площадью 190 га, всего – 1140 га. В целом этот класс землепользования увеличился на 529 га.

Земли населенных пунктов расширились за счет всех остальных классов землепользования: земель сельскохозяйственного назначения – 509 га, высоко- и низкопродуктивных лесов – 305 и 541 га, соответственно, а также болот – 30 га, всего – 1385 га.

Площадь высокопродуктивных лесов сократилась за счет перехода в состав земель сельскохозяйственного назначения – 118 га, земель населенных пунктов – 305 га и низкопродуктивных лесов – 242 га, всего – 666 га.

Низкопродуктивные леса перешли в состав земель сельскохозяйственного назначения и населенных пунктов – 832 и 541 га, соответственно, заболотились 664 га, а также увеличились за счет земель сельскохозяйственного назначения – 21 га, высокопродуктивных лесов – 242 га и болот – 68 га. В итоге этот класс землепользования сократился на 1706 га.

Площадь болот сократилась за счет перехода в состав земель сельскохозяйственного назначения – 190 га, земель населенных пунктов – 30 га и низкопродуктивных лесов – 68 га, одновременно произошло их увеличение за счет земель сельскохозяйственного назначения – 82 га и низкопродуктивных лесов – 664 га. В целом этот класс землепользования увеличился на 459 га.

Суммарное изменение площадей классов землепользования в 2018 году по сравнению с 2001 годом приведено в таблице 4, из которой

следует, что в наибольшей степени расширилась площадь населенных пунктов — на 31,7 %, а сократилась у низкопродуктивных лесов — на 17 %. Анализ выявил негативную тенденцию сокращения площадей лесов обоих классов при росте площадей всех остальных, включая болота. Кроме этого, следует отметить явление зарастания земель сельско-

хозяйственного назначения низкопродуктивными лесами.

На основе баланса площадей по классам землепользования рассчитана матрица вероятностей перехода площадей из одного класса землепользования в другой за рассматриваемый временной интервал, которая представлена в таблице 5.

Таблица 4

Суммарное изменение площадей землепользования по классам на изучаемой территории в 2018 году по сравнению с 2001 годом

Классы землепользования	Площадь землепользования, га		Изменение площади	
	2001 год	2018 год	га	%
Земли сельскохозяйственного назначения	8430	8959	528	6,3
Земли населенных пунктов	4369	5754	1385	31,7
Высокопродуктивные леса	13840	13174	– 666	– 4,8
Низкопродуктивные леса	10036	8330	–1706	–17,0
Болота	3025	3483	459	15,2
Всего	39700	39700	0	0,0

Таблица 5

Матрица вероятностей перехода площадей из одного класса землепользования в другой за период с 2001 по 2018 год

	Земли сельскохозяйственного назначения	Земли населенных пунктов	Высокопродуктивные леса	Низкопродуктивные леса	Болота	Всего
Земли сельскохозяйственного назначения	0,927	0	0,009	0,083	0,063	1,082
Земли населенных пунктов	0,060	1	0,022	0,054	0,010	1,146
Высокопродуктивные леса	0,000	0	0,952	0,000	0,000	0,952
Низкопродуктивные леса	0,003	0	0,018	0,797	0,022	0,839
Болота	0,010	0	0,000	0,066	0,905	0,981
Всего	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Матрица описывает изменения в землепользовании, которые произошли за 17 лет. На основе этой матрицы сделан прогноз землепользования на изучаемой территории на 2035 год, то есть на 17 лет вперед по сравнению с 2018 годом. Результаты прогнозного расчета представлены в таблице 6.

Прогноз имеет консервативный характер и предполагает сохранение на будущее выявленных в результате проведенного исследо-

вания тенденций в землепользовании. Прогноз показывает, что негативное воздействие на леса будет сохраняться и продолжится сокращение их площади. На основе сделанного прогноза и его негативного для лесных площадей характера необходимо разработать систему мероприятий, которая позволила бы изменить существующую тенденцию к сокращению лесов или, по крайней мере, смягчить ее.

Таблица 6

Прогноз изменения площадей землепользования по классам на изучаемой территории в 2035 году по сравнению с 2018 годом

Классы землепользования	Площади землепользования, га		Изменение площади	
	2018 год	2035 год	га	%
Земли сельскохозяйственного назначения	8959	9330	371	4,1
Земли населенных пунктов	5754	7069	1315	22,9
Высокопродуктивные леса	13174	12540	-634	-4,8
Низкопродуктивные леса	8330	6970	-1360	-16,3
Болота	3483	3790	307	8,8
Сумма	39700	39700	0	0,0

Выводы

Итогами проведенного исследования стали следующие результаты:

1. Предложена методика анализа динамики классов землепользования на основе материалов космической съемки Landsat и специализированного программного обеспечения для обработки материалов дистанционного зондирования ENVI.

2. Выполнена автоматизированная классификация космических снимков Landsat 2001 и 2018 гг. на изучаемую территорию. Результаты классификации показали высокую точность – статистика Каппа составила 0,98 для снимка 2001 г. и 0,97 для снимка 2018 г. Выборочная наземная верификация подтвердила соответствие результатов классификации истинным классам землепользования.

3. Оценены изменения площадей каждого класса. За изучаемый период времени струк-

тура классов землепользования изменилась преимущественно за счет увеличения доли земель населенных пунктов и сельскохозяйственного назначения. Площадь лесных насаждений к 2018 году существенно сократилась.

4. Выполнен анализ баланса площадей земель изучаемой территории по классам землепользования. Построена матричная модель динамики площадей различных классов с вычислением вероятностей перехода земель из одной категории в другую. Сделан прогноз распределения площадей по классам землепользования на 17 лет вперед, до 2035 года, и проведен его анализ.

В первую очередь, полученные результаты (карта динамики площадей землепользования по классам, результаты сравнения динамики площадей за разные годы) важны для изучения ландшафтной основы территории Лисинского научно-исследовательского и

учебного полигона. Также результаты исследования могут использоваться в качестве основы при разработке карт динамики площадей по классам и видам землепользования для исследуемой территории. Предложенный методический подход, отраженный на схеме раз-

работки карты динамики площадей землепользования по классам, может применяться для решения задач оценки, мониторинга и управления в лесном и сельском хозяйстве, при управлении территориями, тематическом картографировании, научных исследованиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, А.С. Структура и продуктивность лесов в связи с формами рельефа Карельского перешейка / А.С. Алексеев, Д.М. Черниковский // Лесоведение. – 2001. – № 3. – С. 23–30.
2. Алексеев, А.С. Влияние на динамику лесного фонда смены пород и характера ведения лесного хозяйства в ряде областей Северо-Запада РФ / А.С. Алексеев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – Вып. 186. – 2009. – С. 4–15.
3. Алексеев, А.С. Влияние рельефа на структуру и продуктивность лесных ландшафтов с применением 3-D-моделирования на примере Лисинского учебно-опытного лесхоза / А.С. Алексеев, А.А. Никифоров // Лесоведение. – 2014. – № 5. – С. 42–53.
4. Киреев, Д.М. Ландшафтоведение. Лесное ландшафтоведение: учеб.-науч. изд. / Д.М. Киреев. – СПб.: ИПО СПб ГЛТА, 2007. – 604 с.
5. Любимов, А.В. Географические системы в отраслях лесного комплекса, сельском хозяйстве и охрана природы. Оцифровка изображений: Учебное пособие / А.В. Любимов, Э.О. Салминен, С.В. Вавилов. – СПб.: ИПО ЛТА, 2000. – 95 с.
6. Нгуен Ч.Т. Сравнительный анализ структуры двух смежных ландшафтов Ленинградской области / Ч.Т. Нгуен, В.Л. Сергеева // Актуальные вопросы лесного хозяйства. Материалы II молодежной международной научно-практической конференции 23–24 мая 2018 г. – СПб.: СПбГЛТУ, 2018. – С. 211–213.
7. Никифоров, А.А. Анализ структуры, динамики и продуктивности лесного растительного покрова с применением ГИС-технологий, математического и 3D моделирования: Автореф. дис. канд. с.-х. наук: 06.03.02 / А.А. Никифоров. – СПб., 2005. – 20 с.
8. Пахучий, В.В. Ведение лесного хозяйства на базе ГИС: Учебное пособие / В.В. Пахучий. – Сыктывкар: изд-во СЛИ, 2013. – 56 с.
9. Севко, О.А. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве: курс лекций по одноименной дисциплине для студентов специальности 1-75 01 01 «Лесное хозяйство» / О.А. Севко. – Минск: БГТУ, 2005. – 170 с.
10. Сухих, В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве / В.И. Сухих. – Йошкар-Ола: изд-во МарГТУ, 2005. – 392 с.
11. Abdelhamid, G. An investigation of mineralized zones revealed during geological mapping, Jabal Hamra Faddan – Wadi Araba, Jordan, using LandsatTM data / G. Abdelhamid, I. Rabba // International Journal of Remote Sensing. – 1994. – vol. 15, no. 7. – pp. 1495–1506. DOI: 10.1080/01431169408954179
12. Anderson, J.R. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data / J.R. Anderson, E.E. Hardy, J.T. Roach, R.E. Witmer // U.S. Geological Survey Professional Paper 964. – Washington: Government Printing Office, 1976. – 34 p.
13. Burrough, P.A. Principles of Geographical Information Systems / P.A. Burrough, R.A. McDonnell. – New York: Oxford University Press, 1998. – pp. 17–34.
14. Phiri, D. Developments in Landsat Land Cover Classification Methods: A Review / D. Phiri, J. Morgenroth // Remote Sens. – 2017. – vol. 9, no. 9. – pp. 967–991. URL: <https://doi.org/10.3390/rs9090967>
15. Mirzaei, J. Assessment of Land Cover Changes Using RS and GIS (Case Study: Zagros forests, Iran) / J. Mirzaei, A. Mohamadi, Z. Heidarizadi, H. Noorolahi, R. Omidipour // J. Mater. Environ. Sci. – 2015. – vol. 6, no. 9. – pp. 2565–2572.

16. Kumar, S.S. Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences – A Review / S.S. Kumar, S. Arivazhagan, N. Rangarajan // *J. Environ. Nanotechnol.* – 2013. – vol. 2, no. 2. – pp. 92–101. DOI: [10.13074/jent.2013.06.132025](https://doi.org/10.13074/jent.2013.06.132025)
17. United States Geological Survey (USGS). EarthExplorer. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

REFERENCES

1. Alekseev A.S., Chernihovskij D.M. Struktura i produktivnost' lesov v svyazi s formami rel'efa Karel'skogo pereshejka. *Lesovedenie*, 2001, no. 3, pp. 23–30. (In Russian)
2. Alekseev A.S. Vliyanie na dinamiku lesnogo fonda smeny porod i haraktera vedenija lesnogo hozjajstva v rjade oblastej Severo-Zapada RF. *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, vol. 186, 2009, pp. 4–15. (In Russian)
3. Alekseev A.S., Nikiforov A.A. Vliyanie rel'efa na strukturu i produktivnost' lesnyh landshaftov s primeneniem 3-D modelirovaniya na primere Lisinskogo uchebno-opytного leshoza. *Lesovedenie*, 2014, no. 5, pp. 42–53. (In Russian)
4. Kireev D.M. Landshaftovedenie. Lesnoe landshaftovedenie: ucheb.-nauch. izd. St. Petersburg, 2007, 604 p. (In Russian)
5. Ljubimov A.V., Salminen Je.O., Vavilov S.V. Geograficheskie sistemy v otrasljah lesnogo kompleksa, sel'skom hozjajstve i ohrana prirody. Ocifrovka izobrazhenij: Uchebnoe posobie. St. Petersburg, 2000, 95 p. (In Russian)
6. Nguen Ch.T., Sergeeva V.L. Sravnitel'nyj analiz struktury dvuh smezhnyh landshaftov Leningradskoj oblasti. *Proceeding of the II Youth International Scientific and Practical Conference "Actual Issues of Forestry"* 23–24 maja 2018 g. St. Petersburg, 2018, pp. 211–213. (In Russian)
7. Nikiforov A.A. Analiz struktury, dinamiki i produktivnosti lesnogo rastitel'nogo pokrova s primeneniem GIS-tehnologij, matematicheskogo i 3D modelirovaniya: Extended abstract of candidate's thesis. St. Petersburg, 2005, 20 p. (In Russian)
8. Pahuchij V.V. Vedenie lesnogo hozjajstva na baze GIS: Uchebnoe posobie. Syktyvkar, 2013, 56 p. (In Russian)
9. Sevko O.A. Ajerokosmicheskie metody v lesnom hozjajstve: kurs lekcij po odnoimennoj discipline dlja studentov special'nosti 1-75 01 01 "Lesnoe hozjajstvo". Minsk, 2005, 170 p. (In Russian)
10. Suhij V.I. Ajerokosmicheskie metody v lesnom hozjajstve i landshaftnom stroitel'stve. Joshkar-Ola, 2005, 392 p. (In Russian)
11. Abdelhamid G., Rabba I. An investigation of mineralized zones revealed during geological mapping, Jabal Hamra Faddan – Wadi Araba, Jordan, using LandsatTM data. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, vol. 15, no. 7 pp. 1495–1506. DOI: [10.1080/01431169408954179](https://doi.org/10.1080/01431169408954179)
12. Anderson J.R., Hardy E.E., Roach J.T., Witmer R.E. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 964. Washington, 1976, 34 p.
13. Burrough P.A., McDonnell R.A. Principles of Geographical Information Systems. New York, 1998, pp. 17–34.
14. Phiri D., Morgenroth J. Developments in Landsat Land Cover Classification Methods: A Review. *Remote Sens.*, 2017, vol. 9, no. 9, pp. 967–991. URL: <https://doi.org/10.3390/rs9090967>
15. Mirzaei J., Mohamadi A., Heidarizadi Z., Noorolahi H., Omidipour R. Assessment of Land Cover Changes Using RS and GIS (Case Study: Zagros forests, Iran). *J. Mater. Environ. Sci.*, 2015, vol. 6, no. 9, pp. 2565–2572.
16. Kumar S.S., Arivazhagan S., Rangarajan N. Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences – A Review. *J. Environ. Nanotechnol.*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 92–101. DOI: [10.13074/jent.2013.06.132025](https://doi.org/10.13074/jent.2013.06.132025)
17. United States Geological Survey (USGS). EarthExplorer. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Статья поступила в редакцию 5.03.2021