

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

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ И ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЗЕМЕЛЬ ПУШКИНСКОГО РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Введение. Геоинформационные технологии (ГИС-технологии) и методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время широко используются в различных областях науки и хозяйственной деятельности, в том числе и в лесном хозяйстве. ГИС-технологии и методы дистанционного зондирования помогают ученым и специалистам при проведении полевых и камеральных работ, способствуют снижению затрат и получению более точных и надежных результатов по сравнению с традиционными методами исследований [Maguire et al, 1991; Чандра, Гош, 2008].

Развитие автоматизированных методов обработки материалов ДЗЗ является общемировым трендом последних десятилетий. Методы автоматизированной классификации материалов ДЗЗ востребованы и активно используются во многих странах при проведении работ по инвентаризации лесов, проектированию использования лесов и изучению их состояния и характеристик. Автоматизированные методы классификации материалов ДЗЗ способствуют снижению стоимости и трудоемкости работ, повышению производительности и уменьшению субъективности получаемых оценок лесов. Базовые сведения о распространенных алгоритмах автоматизированной классификации материалов ДЗЗ изложены в учебных пособиях и монографиях [Franklin, 2001; Рис, 2006; Чандра, Гош, 2008; Токарева, 2010; Шовенгердт, 2010].

Арсенал средств автоматизированной классификации, применяемых при изучении лесов, достаточно велик. Используется значительное количество типовых и оригинальных методов классификации – минимального расстояния, объектно-ориентированного дешифрирования, гиперпараллелепипеда, максимального правдоподобия, спектрального угла, искусственных нейронных сетей, локально-адаптивной классификации, опорных векторов и множество других.

В ряде исследований демонстрируется использование вегетационных индексов для классификации растительного покрова [Нешатаев М.В. и В.Ю, 2012; Шарикалов, Якутин, 2014; Соромотин, Бродт, 2018; Али и др., 2020].

Значительное количество исследований посвящено изучению динамических процессов изменения растительности с применением временных

рядов материалов ДЗЗ [Жири́н и др., 2011; Ramachandran et al., 2011; Frazier et al., 2015; Барталев и др., 2016; Chu et al., 2016; Воробьев и др., 2019а и 2019б]. Ряд публикаций связан с применением вегетационных индексов для изучения процессов восстановления растительности после гарей, вырубок и других нарушений лесного покрова [Vilaa, Barbosa, 2010; Воробьев и др., 2012; Белова, Ершов, 2015; Воробьев, Курбанов, 2016; Воробьев и др., 2017; Белова, Ершов, 2019].

В большинстве исследований последних десятилетий используются материалы космических съемок открытого доступа Landsat [Vilaa, Barbosa, 2010; Нешатаев М.В. и В.Ю., 2012; Frazier et al., 2015; Воробьев и др., 2016; Chu, Takeda, 2016; Соромотин, Бродт, 2018; Белова, Ершов, 2019]. Известными преимуществами материалов съемок с ресурсных спутников служат их доступность, значительный охват территории, наличие набора спектральных каналов, применяемых при изучении растительного покрова, значительный временной охват и регулярная повторяемость съемок. Сравнительно низкое пространственное разрешение ресурсных спутников не является недостатком при решении многих задач лесного хозяйства (выполнении оценок и мониторингов повреждений, вырубок, состояния и структуры лесов). Генерализация изображения даже может способствовать более успешному выделению отдельных категорий земель.

Задачи исследования состояли в разработке методики и проведении классификации категорий земель крупной административно-территориальной единицы на основе дистанционных методов и ГИС-технологий.

Материалы, изложенные в статье, были получены в результате реализации проекта по изучению экологического состояния Пушкинского района Санкт-Петербурга.

Объект и методика исследования. Объектом исследования служила территория Пушкинского района Санкт-Петербурга. Пушкинский район занимает территорию 240,3 км² и является вторым по площади среди районов Санкт-Петербурга (занимает 16.7% площади Санкт-Петербурга). Географически район расположен в южной части Санкт-Петербурга и граничит с Фрунзенским, Московским, Колпинским районами города, а также Тосненским, Гатчинским и Ломоносовским районами Ленинградской области.

На территории Пушкинского района расположено значительное количество зелёных насаждений (парки, скверы, сады, лесополосы), часть из которых включена в список памятников, охраняемых ЮНЕСКО, в составе объекта «Исторический центр Санкт-Петербурга и связанные с ним комплексы памятников». Промышленность Пушкинского района представлена предприятиями машиностроительной, полиграфической, пищевой, автомобильной, оборонной отраслей. В Пушкинском районе расположено несколько

ко крупных производственных зон: Шушары-1, Шушары-2, Шушары-3, Пушкинская (Восточная), производственная зона у Казанского кладбища. Также на территории района развито сельское хозяйство, производство молока и мяса, овощеводство в открытом и закрытом грунте (Паспорт Пушкинского района Санкт-Петербурга. 2019. URL: <https://www.gov.spb.ru>).

Основные этапы и содержание работ отражены в табл. 1.

Таблица 1

Содержание и порядок работ по классификации категорий земель Пушкинского района Санкт-Петербурга на основе данных Landsat-8

The content and order classification of land categories in Pushkin district of St. Petersburg based on Landsat-8

Этап	Содержание	Программное обеспечение
1. Формирование проекта модельной территории в ГИС	Определение области исследования. Отбор исходных картографических материалов, перевод в цифровую форму, формирование проекта в ГИС	ГИС ArcGIS
2. Получение материалов дистанционного зондирования Земли	Поиск, загрузка, первичная обработка материалов съемки Landsat-8, трансформация в ГИС-проект	картографический сервис USGS, ГИС ArcGIS
3. Формирование набора эталонных участков для классификации	Планирование мест размещения эталонных участков, наземное обследование с фотографированием и определением координат с помощью GPS, определение границ участков в ГИС	ГИС ArcGIS, программа ENVI
4. Классификация материалов космической съемки	Оценка разделимости выбранных классов, автоматизированная классификация методом максимального правдоподобия, оценка качества классификации. Определение и анализ вегетационных индексов NDVI для изучаемых классов.	ГИС ArcGIS, программа ENVI
5. Верификация результатов классификации	Планирование мест для закладки тестовых участков на местности, наземное обследование, анализ результатов	ГИС ArcGIS, программа ENVI
6. Получение итоговых материалов	Совместная обработка и анализ результатов автоматизированной классификации материалов космической съемки с картой NDVI, другими картографическими материалами и результатами полевых обследований. Формирование тематических карт и таблиц распределения площадей	ГИС ArcGIS, MapInfo, программы ENVI и Trimble eCognition

В качестве исходных материалов дистанционного зондирования использовались спутниковые изображения Landsat-8 (пространственное разрешение 30 м), полученные в 2018 году. Использовался также набор карт на изучаемую территорию (топографическая, экологическая, почвенная, ландшафтная, кадастровая карты). Программными средствами для сбора, представления и обработки данных служили ГИС Arcgis и Mapinfo, и программы ENVI и Trimble eCognition.

Перед проведением классификации космического снимка проводился отбор эталонных (тренировочных) участков. Отбор включал выбор участка на местности, фотографирование, определение его расположения на космическом снимке.

Классификация снимка Landsat осуществлялась по результатам двух основных операций – автоматизированного дешифрирования методом максимального правдоподобия и определения вегетационных индексов классов представленных объектов. Использовалась комбинация каналов 6-5-4 (SWIR-2 – NIR – RED). При таком сочетании здоровая растительность выглядит ярко-зеленой, почвы – розовато-лиловыми. Данная комбинация дает возможность анализировать состояние и свойства сельскохозяйственных угодий. Эта комбинация удобна для изучения растительного покрова и широко используется для анализа состояния лесных сообществ (Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM / ETM+. URL: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html>).

Для оценки качества выполненной классификации проводилось полевое обследование выборочных участков, равномерно распределенных на исследуемой территории и отличающихся по местоположению от эталонных (тренировочных) участков, используемых при классификации.

Результаты исследования. Образцы эталонных (тренировочных) участков отдельных классов категорий земель на территории Пушкинского района показаны на рис. 1.

Результаты преобразования космических снимков в индексные NDVI-изображения показаны на рис. 2, а усредненные значения индексов различных классов категорий земель – в табл. 2. Средние значения индексов для отдельных классов категорий земель были получены средствами ГИС (путем определения статистических характеристик растрового изображения NDVI в пределах известных категорий земель).

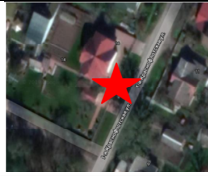
Снимок Landsat-8	Фотография	Снимок Landsat-8	Фотография
			
Лес		Садоводство	
			
Частный земельный участок (сад)		Пустырь (заброшенная пашня)	
			
Кладбище		Молодняк	
			
Водоем		Пашня	
			
Газон		Луг	

Рис. 1. Образцы изображений эталонных (тренировочных) участков классов категорий земель

Fig. 1. Examples of images for reference (training) samples of classes of land categories

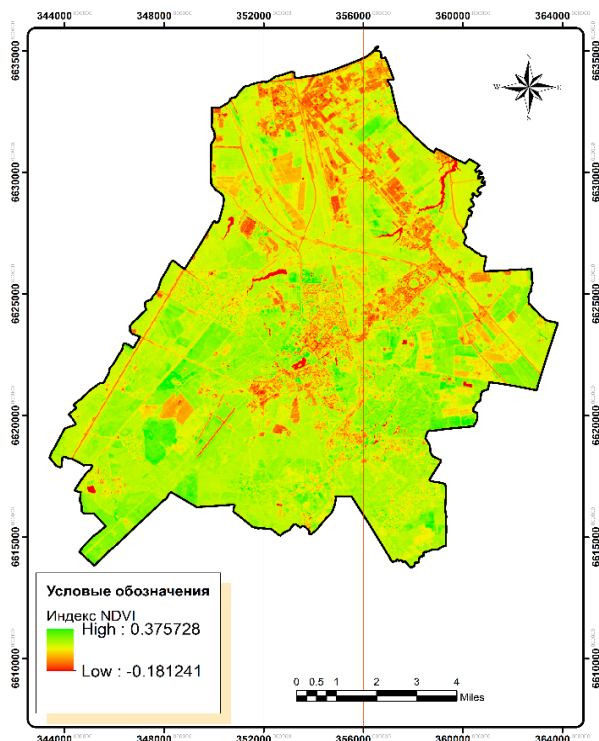


Рис. 2. Карта значений вегетационного индекса NDVI на территории Пушкинского района Санкт-Петербурга

Fig. 2. Map of values of the vegetation index NDVI for the Pushkin district of St. Petersburg

Анализ табл. 2 позволяет увидеть, что наибольшие значения индекса NDVI наблюдаются для лесов и парковых ландшафтов, наименьшие – для категорий, лишенных растительности (пашен, пустырей, жилых массивов, водных поверхностей).

Процесс выбора эталонных (тренировочных) участков на материалах съемки Landsat для проведения классификации в программе Trimble eCognition изображен на рис. 3.

После выбора достаточного числа тренировочных участков по классам категорий земель и оценки их спектральной разделимости была проведена автоматизированная классификация методом максимального правдоподобия. Общая точность выполненной классификации (доля правильно классифицированных пикселей тренировочных участков) составила 95,8%.

Таблица 2

**Средние значения индекса NDVI для классов категорий земель
на изображениях Landsat-8**

Average NDVI index values for land category classes in Landsat-8 images

№ п/п	Классы категорий земель	Индекс NDVI	№ п/п	Классы категорий земель	Индекс NDVI
1	Леса спелые	0.37	12	Заболоченные луга	0.09
2	Молодняки густые	0.29	13	Молодняки редкостойные	0.07
3	Полуоткрытые ландшафты (парки)	0.26	14	Кустарники	0.05
4	Закрытые ландшафты (парки)	0.24	15	Болота	0.04
5	Луга	0.22	16	Кладбища	0
6	Частные земельные участки (сады)	0.21	17	Пашни	-0.03
7	Садоводства	0.18	18	Пустыри	-0.05
8	Газоны	0.16	19	Пасеки	-0.08
9	Кустарники	0.15	20	Линейные объекты (дороги, линии электропередач и др.)	-0.1
10	Огороды	0.13	21	Жилые массивы	-0.12
11	Сенокосы	0.11	22	Водоемы	-0.18

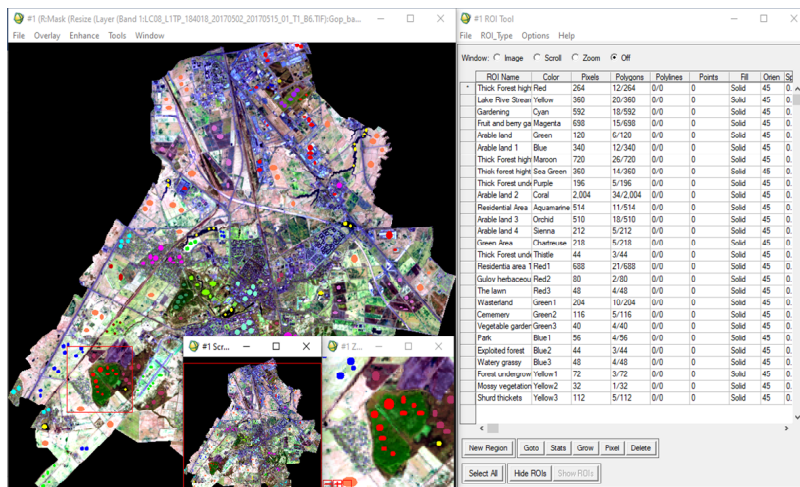


Рис. 3. Процесс выбора тренировочных участков на снимке Landsat-8 (комбинация каналов 6-5-4) в программе Trimble eCognition

Fig. 3. Process for selecting training samples on a Landsat-8 imagery (channel combination 6-5-4) in Trimble eCognition software

Результат автоматизированной классификации категорий земель Пушкинского района Санкт-Петербурга показан на рис. 4.

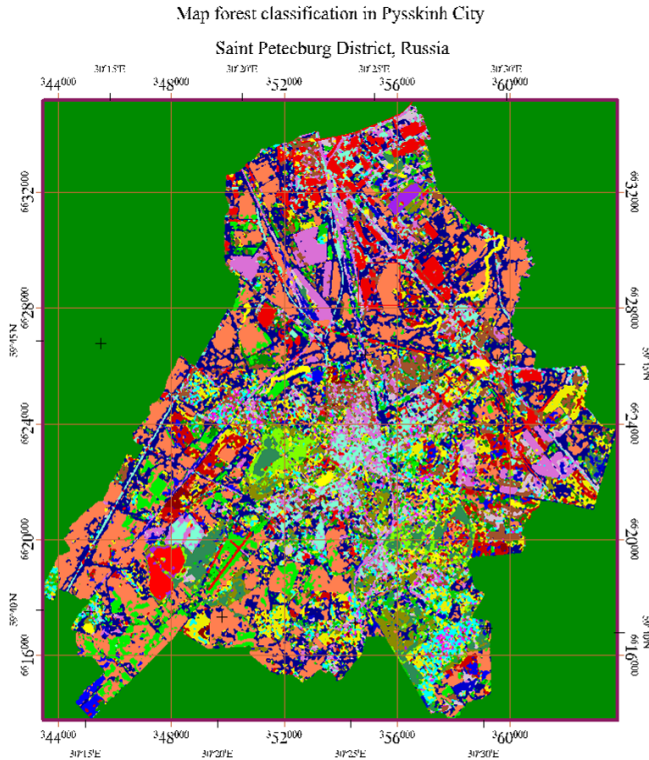


Рис. 4. Результат классификации космического снимка Landsat-8 методом максимального правдоподобия

Fig. 4. The result of the classification of the Landsat-8 satellite image by the maximum likelihood method

Далее результаты автоматизированной классификации были сопоставлены с картой индекса NDVI, обобщены и обработаны. Обобщение (агрегирование) заключалась в объединении близких по целевому назначению классов категорий земель, изначально выделяемых раздельно по спектральному различию (так, в частности, поступили с несколькими классами сельскохозяйственных земель, отличающихся по спектральным характеристикам на снимке Landsat, объединив их в класс «пашни»). Обработка (постобработка) выполнялась в целях повышения наглядности результатов классификации и их приведения к виду, пригодному для практического использования (созданию векторных карт, оценке геометрических характеристик). Для этого изначально выполнялась операция «просеивание» (переклассификация единич-

ных пикселей разных классов, находящихся в окружении пикселей одного класса), направленная на снижение пространственных «шумов». Также использовались операции по переклассификации отдельных значений раstra, расширению-сужению границ отдельных классов в целях формирования более четких границ между классами. После проведения перечисленных действий результаты классификации были переведены в векторный формат с атрибутами – наименованиями и площадями классов.

Результаты автоматизированной классификации проверялись путем наземных обследований.

Тематическая карта классов земель Пушкинского района, полученная в результате классификации снимка Landsat-8 методом максимального правдоподобия, показана на рис. 5.

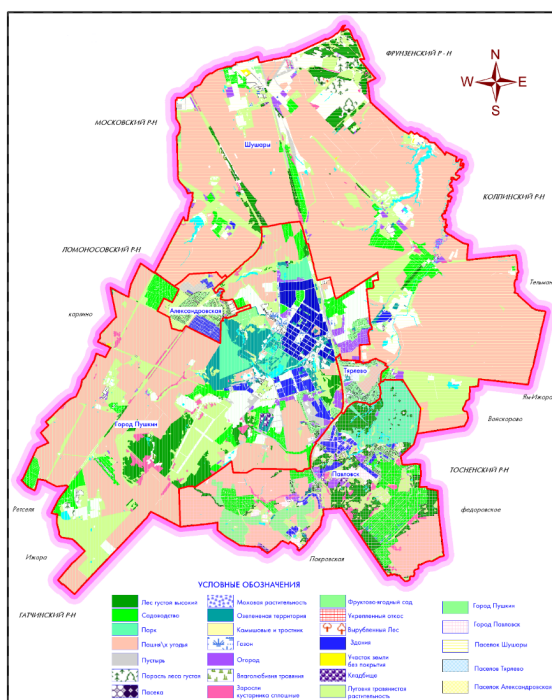


Рис. 5. Карта классов категорий земель Пушкинского района Санкт-Петербурга с границами муниципальных образований

Fig. 5. The map of land categories classes for the Pushkin district of St. Petersburg with the boundaries of municipalities

Дальнейшее выделение из результатов классификации объектов, расположенных в определенных границах (например, земель сельскохозяйственного назначения, лесного фонда, населенных пунктов и др.) не представляет технических сложностей. Типовыми средствами ГИС можно получить распределение категорий земель внутри задаваемых границ, например, в пределах муниципальных образований Пушкинского района (табл. 3).

Таблица 3

**Распределение классов категорий земель Пушкинского района
по муниципальным образованиям**

**Distribution of classes of land categories for the Pushkin district
of St. Petersburg by municipalities**

№ п/п	Классы категорий земель	Пло- щадь, га	Доля, %	Муниципальное образование				
				г. Пушкин	г. Павловск	пос. Алек- сандровский	пос. Тярлево	пос. Шушары
1	Леса	1170,3	4,9	447,8	442,4	–	–	280.1
2	Луга	3440,5	14,3	1523,7	402,5	112,0	47,9	1354.3
3	Пустыри	288,1	1,2	145,1	28,4	28,7	0,7	85.3
4	Полуоткрытые ландшафты (парки)	422,1	1,8	380,9	21,7	2,5	2,8	14.2
5	Кустарники	293,5	1,2	154,0	84,1	1,9	1,5	52.1
6	Закрытые ландшафты (парки)	694,0	2,9	287,6	405,1	1,1	0,2	–
7	Пашни	11855,3	49,5	3518,1	1002,7	59,4	53,0	7222.0
8	Молодняки густые	146,6	0,6	13,2	–	–	–	133.4
9	Водная растительность	40,5	0,2	18,9	0,2	0,0	0,0	21.4
10	Огороды	345,0	1,4	159,8	75,7	5,5	5,7	98.3
11	Газоны	135,3	0,6	103,4	5,5	3,0	5,7	17.6
12	Частные сады	727,5	3,0	144,3	344,0	122,9	90,3	26.0
13	Садоводства	1372,9	5,7	551,5	488,9	1,1	0,0	331.4
14	Кладбища	36,6	0,2	19,3	12,9	0,0	0,0	4.3
15	Жилые массивы	2788,0	11,6	1375,0	333,7	137,5	53,8	887.9
16	Водоемы	225,9	0,9	85,7	30,1	1,2	0,3	108.7
Всего		23 981,9	100,0	8928,4	3677,8	476,9	261,9	10636,9

Особенностью исследования был выбор модельной территории с широким набором категорий земель, отражающихся на материалах космической съемки. Успешное выявление и ограничение на материалах съемки разных по происхождению, ведомственной принадлежности, спектральным характеристикам классов категорий земель, составляющих модельную территорию, позволяет позитивно оценивать перспективы дальнейшего применения и развития описанного подхода. Несмотря на то, что категории земель, связанные с лесным растительным покровом, были представлены лишь несколькими классами, рассмотренный подход может быть полезен для изучения лесного фонда. В составе земель лесного фонда могут находиться многочисленные категории непокрытых лесом (гарей, вырубок, погибших насаждений, лесных культур) и нелесных земель (пашни, сенокосы, луга, болота, кладбища, нефте- и газопроводы, водоемы, карьеры, сады, стадионы и др.). Вопросы оперативного выявления, разграничения, оценки состояния и характеристик имеющихся категорий земель актуальны при проведении многих мероприятий – государственной (национальной) инвентаризации лесов, различных видов мониторинга территории, выявлении участков для лесовосстановления и лесоразведения, оценке транспортной доступности, изучении структуры и состояния земель и решении других задач.

Безусловно, детальная инвентаризация территории с целью хозяйственного планирования и управления требует более детальных, трудоемких и дорогостоящих исследований с применением материалов съемок с лучшими характеристиками, чем Landsat. Периодичность обновления детальной информации о лесах относительно низкая (лесоустройство проводится один раз в 10–15 лет), стоимость работ и материалов – высокая, возможности получения материалов лесоустройства для широкого круга пользователей ограничены. Стоит отметить, что основное внимание при лесоустройстве уделяется преимущественно лесным землям. Описание, контурное дешифрирование, оценка динамических изменений нелесных земель, не представляющих существенного интереса для лесного хозяйства, часто выполняются формально. Между тем, выявление, оценка состояния и характеристик категорий нелесных земель, расположенных на территории лесного фонда, представляют интерес для решения ряда научных и практических задач по учету и управлению природными ресурсами (например, для оценки углеродного баланса, выбора участков для компенсационного лесоразведения).

Выводы. Предложенный подход с применением автоматизированного дешифрирования материалов космической съемки, использованием значений вегетационного индекса NDVI и совместным анализом набора пространственных данных средствами ГИС позволил успешно выполнить классификацию категорий земель крупного городского района Санкт-Петербурга. Результаты классификации подтверждены наземными обследованиями. Представленная методика позволяет проводить классификацию земель крупных единиц административно-территориального деления на основе общедоступных материалов космической съемки среднего пространственного разрешения и выборочных наземных обследований оперативно и многократно в течение вегетационного периода.

Важным вопросом при проведении классификации является принципиальная возможность выделения определенных классов на конкретных материалах дистанционного зондирования. В настоящем исследовании для повышения надежности автоматизированной классификации методом максимального правдоподобия использовались значения вегетационных индексов NDVI для основных классов.

Представленная методика, связанная с обработкой и интерпретацией материалов дистанционного зондирования средствами ГИС-технологий, может рассматриваться в качестве современного инструмента ландшафтного анализа, государственной (национальной) инвентаризации лесов, различных видов мониторинга территории.

Библиографический список

Али М.С., Воробьёв О.Н., Курбанов Э.А. Алгоритм «дерево решений» для классификации лесов Сирийской Арабской Республики по снимку SENTINEL-2 // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2020. № 1 (45). С. 5–30. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.1.5

Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

Белова Е.И., Еришов Д.В. Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам Landsat // Лесоведение. 2015. № 5. С. 339–345.

Белова Е.И., Еришов Д.В. Исследование возможности оценки возобновления лесной растительности после сплошных рубок по спутниковым данным Landsat (на примере Брянского Полесья) // Вопросы лесной науки. Т 2 (4). 2019. С. 1–20. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-20

Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Демишева Е.Н., Меньшиков С.А., Смирнова Л.Н. Алгоритм определения фенологических характеристик лесного покрова на основе временных рядов спутниковых данных // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2019а. № 1 (41). С. 5–20. DOI: 10.25686/2306-2827.2019.1.5

Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Демишева Е.Н., Меньшиков С.А., Али М.С., Смирнова Л.Н., Тарасова Л.В. Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019b. 165 с.

Воробьев О.Н., Курбанов Э.А. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. № 14(2). С. 84–97. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-84-97

Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А. Дистанционный мониторинг гарей в Марийском Заволжье // Вестник ПГТУ. 2012. №1. С. 12–22.

Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Полевщикова Ю.А., Лежнин С.А. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 124–134. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134

Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлиня С.П. Использование материалов съемок при оценке восстановительной динамики лесов на равнинных территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 208–216.

Нешатаев М.В., Нешатаев В.Ю. Комбинированный метод картографирования растительности (на примере Лапландского заповедника) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2012. Вып. 201. С. 29–40.

Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. 336 с.

Соромотин А.В., Бродт Л.В. Мониторинг растительного покрова при освоении нефтегазовых месторождений по данным многозональной съемки LANDSAT // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2018. Т. 4. №1. С. 37–49. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-37-49

Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 148 с.

Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.

Шарикалов А.Г., Якутин М.В. Анализ состояния таежных экосистем с использованием методики автоматизированного дешифрирования // Известия Алтайского государственного университета. Науки о Земле. 2014. Вып. 3-1(83). С. 123–127. DOI: 10.14258/izvasu(2014)3.1-22

Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

Chu T., Guo X., Takeda K. Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest // *Ecological Indicators*. 2016. Is. 62. P. 32–46. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.11.026

Franklin S.E. Remote sensing for sustainable forest management. LEWIS PUBLISHERS Boca Raton London New York Washington, 2001. 407 p.

Frazier R.J., Coops N.C., Wulder M.A. Boreal Shield forest disturbance and recovery trends using Landsat time series // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Is. 170. P. 317–327. DOI:10.1016/j.rse.2015.09.015

Maguire D.J., Goodchild M.F., Rhind D.W., Geographical information systems: principles and applications. New York: Wiley, Harlow, England, 1991. 649 p.

Ramachandran B., Justice C.O., Abrams M.J. Land Remote Sensing and Global Environmental Change NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS. Springer Science+Business Media, LLC, 2011. 873 p.

Vilaa J.P.S., Barbosa P. Post-fire vegetation regrowth detection in the Deiva Marina region (Liguria-Italy) using Landsat TM and ETM+ data // *Ecological Modelling*. 2010. Is. 210. P. 75–84.

References

Ali M.S., Vorobev O.N., Kurbanov E.A. Decision tree algorithm for forest classification of Syrian Arab Republic with the use of Sentinel-2 image. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2020, is. 1 (45), pp. 5–30. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.1.5. (In Russ.)

Bartalev S., Egorov V., Zharko V., Loupian E., Plotnikov D., Khvostikov S., Shabanov N. Land cover mapping over Russia using Earth observation data. Moscow: Russian Academy of Sciences' Space Research Institute, 2016, 208 p. (In Russ.)

Belova E.I., Ershov D.V. Assessing reforestation on clear cuts based on Landsat time series. *Lesovedenie*, 2015, is. 5, pp. 339–345. (In Russ.)

Belova E.I., Ershov D.V. Using Landsat time series for assessing reforestation on clear cuts in Bryansk region. *Forest science issues*, 2019, is. 2(4), pp. 1–20. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-20. (In Russ.)

Vorobev O.N., Kurbanov E.A., Demisheva E.N., Menshikov S.A., Smirnova L.N. Algorithm for reviling the phenological parameters of forest cover on the base of time series of satellite data. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2019a, is. 1 (41), pp. 5–20. DOI: 10.25686/2306-2827.2019.1.5 (In Russ.)

Vorobev O.N., Kurbanov E.A., Demisheva E.N., Menshikov S.A., Ali M.S., Smirnova L.N., Tarasova L.V. Remote monitoring of forest ecosystems sustainability. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2019b, 166 p. (In Russ.)

Vorobev O.N., Kurbanov E.A. Remote monitoring of vegetation regeneration dynamics on burnt areas of Mari Zavolzhje forests. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, is. 14(2), pp. 84–97. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-84-97. (In Russ.)

Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Gubayev A.V., Leznin S.A., Polevshikova Y.A. Remote monitoring of forest burnt areas in Mari Zavolzhje. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2012, is. 1, pp. 12–22. (In Russ.)

Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Polevshikova Y.A., Leznin S.A. Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, vol. 13, is. 4, pp. 124–134. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134. (In Russ.)

Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Application of space images for reforestation dynamics evaluating on the plane territories. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, vol. 8, is. 2, pp. 208–216. (In Russ.)

Neshataev M.V., Neshataev V.Yu. Combined method of vegetation mapping (on the example of the Lapland reserve). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2012, is. 201, pp. 29–40. (In Russ.)

Rees W.G. *Physical Principles of Remote Sensing*. Moscow: Technosfera, 2006, 336 p. (In Russ.)

Soromotin A.V., Brodt L.V. Monitoring of vegetation cover during the development of oil and gas fields according to the Landsat multispectral survey data. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, 2018, vol. 4, is. 1, pp. 37–49. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-37-49. (In Russ.)

Tokareva O.S. *Processing and interpreting of Earth remote sensing data*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2010, 148 p. (In Russ.)

Chandra A.M., Ghosh S.K. *Remote Sensing and Geographic Information Systems*. Moscow: Technosfera, 2008, 312 p. (In Russ.)

Sharikalov A.G., Yakutin M.V. The analysis of taiga ecosystems condition applying automatic decoding method. *Izvestiya of Altai State University. Earth sciences*, 2014, is. 3-1 (83), pp. 123–127. DOI: 10.14258/izvasu(2014)3.1-22 (In Russ.)

Schowengerdt R.A. *Remote sensing. Methods and models of image processing*. Moscow: Technosfera, 2010, 560 p. (In Russ.)

Chu T., Guo X., Takeda K. Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest. *Ecological Indicators*, 2016, is. 62, pp. 32–46. DOI:10.1016/j.ecolind.2015.11.026

Franklin S.E. *Remote sensing for sustainable forest management*. LEWIS PUBLISHERS Boca Raton London New York Washington, 2001, 407 p.

Frazier R.J., Coops N.C., Wulder M.A. Boreal Shield forest disturbance and recovery trends using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 2015, is. 170, pp. 317–327. DOI: 10.1016/j.rse.2015.09.015

Maguire D.J., Goodchild M.F., Rhind D.W., Geographical information systems: principles and applications. New York: Wiley, Harlow, England, 1991, 649 p.

Ramachandran B., Justice C.O., Abrams M.J. Land Remote Sensing and Global Environmental Change NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS. Springer Science+Business Media, LLC, 2011, 873 p.

Vilaa J.P.S., Barbosa P. Post-fire vegetation regrowth detection in the Deiva Marina region (Liguria-Italy) using Landsat TM and ETM+ data. *Ecological Modelling*, 2010, is. 210, pp. 75–84.

Материал поступил в редакцию 23.04.2021

Фан Тхань Куэт, Нгуен Чонг Тай, Алексеев А.С., Любимов А.В., Сергеева В.Л., Черниховский Д.М. Применение дистанционных методов и ГИС–технологий для классификации земель Пушкинского района Санкт-Петербурга // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 235. С. 84–102. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.84-102

ГИС-технологии и методы автоматизированной классификации материалов ДЗЗ активно используются во многих странах при проведении работ по инвентаризации лесов, проектированию использования лесов и изучению их состояния и характеристик. Задачи исследования состояли в разработке методики и проведении автоматизированной классификации категорий земель крупной административно-территориальной единицы на основе дистанционных методов и ГИС-технологий. Объектом исследования служила территория Пушкинского района Санкт-Петербурга. На территории Пушкинского района расположено значительное количество зелёных насаждений (парки, скверы, сады, лесополосы), часть из которых включена в список памятников, охраняемых ЮНЕСКО. Также на территории района расположены промышленные предприятия, крупные производственные зоны, развито сельское хозяйство. В качестве исходных материалов дистанционного зондирования использовались спутниковые изображения Landsat-8. Использовался также набор карт на изучаемую территорию. Программными средствами для сбора, представления и обработки данных служили ГИС Arcgis и Mapinfo, и программы ENVI и Trimble eCognition. Наземные работы по отбору эталонных (тренировочных) участков включали выбор участка на местности, фотографирование, определение координат. Классификация снимка Landsat осуществлялась по результатам двух основных операций – автоматизированного дешифрирования методом максимального правдоподобия и определения вегетационных индексов классов представленных категорий земель. После наземной верификации результатов классификации и выполнения операций обработки и агрегирования была сформирована итоговая тематическая карта

классов категорий земель Пушкинского района и получены итоговые таблицы распределения площадей по муниципальным образованиям. Представленная методика, связанная с обработкой и интерпретацией материалов дистанционного зондирования средствами ГИС-технологий, может рассматриваться в качестве современного инструмента ландшафтного анализа, государственной (национальной) инвентаризации лесов, различных видов мониторинга.

Ключевые слова: географические информационные системы, материалы дистанционного зондирования, автоматизированная классификация, категория земель, индекс NDVI.

Phan Thanh Quyet, Nguyen Trong Tai, Alekseev A.S., Lyubimov A.V., Sergeeva V.L., Chernikhovskii D.M. Application of remote sensing methods and GIS technologies for the classification of lands in the Pushkin district of St. Petersburg. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoi Akademii*, 2021, is. 235, pp. 84–102 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.84-102

GIS technologies and methods of automated classification of remote sensing data are actively used in many countries in forest inventory, forest management planning and assessment of the state and characteristics of forests. The objectives of the study were to develop a methodology and conduct an automated classification of land categories for a large administrative-territorial unit based of remote sensing methods and GIS-technologies. The object of the study was the territory of the Pushkin district of St. Petersburg. On the territory of the Pushkin district are located a significant number of green zones (parks, squares, gardens, forest belts), some of which are included in the list of monuments protected by UNESCO. Also on the territory of the district are located industrial enterprises, large industrial zones, agriculture is developed. Landsat-8 satellite images and a set of maps for the study area were used as initial materials. GIS ArcGIS and MapInfo, programs ENVI and Trimble eCognition were used to collect, visualize and process data. Field work on the selection of reference (training) samples included the selection of sample plots in nature, photography, and determination of coordinates. The Landsat images were classified according to the results of two main operations – automated interpretation by the maximum likelihood method and determination of the vegetation indices of the land categories classes. After performing field verification, as well as performing processing and aggregation operations, the final thematic map of the classes of land categories in the Pushkin region was formed and the final tables of the distribution of areas by municipalities were obtained. The presented methodology, associated with the processing and interpretation of remote sensing materials by means of GIS technologies, can be considered as a modern tool for landscape analysis, state (national) forest inventory, and various types of territory monitoring.

Key words: geographic information systems, remote sensing data, automated classification, land category, NDVI index.

ФАН Тхань Куэт – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: thanhquyetqbuni@gmail.com

PHAN Thanh Quyet – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: thanhquyetqbuni@gmail.com

НГУЕН Чонг Тай – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: thanhquyetqbuni@gmail.com

NGUYEN Trong Tai – PhD student, St St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: thanhquyetqbuni@gmail.com

АЛЕКСЕЕВ Александр Сергеевич – профессор, заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор географических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a_s_alekseev@mail.ru

ALEKSEEV Aleksandr Sergeevich – DSc (Geography), professor, head of the department of forest inventory, management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: a_s_alekseev@mail.ru

ЛЮБИМОВ Александр Владимирович – профессор кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lyubimofff@yandex.ru

LYUBIMOV Aleksandr V. – DSc (Agricultural), professor of the department of forest inventory, management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: lyubimofff@yandex.ru

СЕРГЕЕВА Валерия Лейзеровна – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат биологических наук.

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

SERGEeva Valeria L. – PhD (Biological), associate professor of the department of forest inventory, management and GIS, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia.

ЧЕРНИХОВСКИЙ Дмитрий Михайлович – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: cherndm2006@yandex.ru

CHERNIKHOVSKIИ Dmitrii M. – PhD (Agricultural), associate professor of the department of forest inventory, management and GIS St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: E-mail: cherndm2006@yandex.ru