

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630*583

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ГОРОДСКИХ ЛЕСОВ

**О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов, А. В. Губаев, Ю. А. Полевщикова,
Е. Н. Демишева, В. О. Коптелов**

Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3
E-mail: vorobievon@volgatech.net

Проанализирована приемлемость ландшафтных индексов для оценки пространственного распределения городских лесов муниципального образования «город Йошкар-Ола» за 1981, 2001 и 2014 гг. методами дистанционного зондирования. Для исследований использованы архивные снимки спутника Landsat, кадастровая карта и план города, спутниковые данные более высокого разрешения Canopus и Rapid Eye. Анализ вновь полученных разновременных тематических карт на территорию г. Йошкар-Олы показал неоднородность структуры её лесных участков. Заметно выделяются крупные лесные участки в юго-восточной и центральной части городского округа, которые сильно влияют на общий тренд динамики ландшафтных показателей. Полученные данные свидетельствуют о том, что за последние 25 лет на территории исследований наблюдается увеличение фрагментированности участков городских лесов и происходит существенное сокращение класса лиственных и смешанных насаждений с 1527,4 га до 1069,3 га. Также произошло увеличение количества лесных участков городских лесов с 1865 в 1989 году до 1998 в 2014 году. Точность полученных данных подтверждается современными критериями геоинформационной статистики. Предложенный метод тематического картирования и оценки городских лесов методами дистанционного зондирования по ландшафтным показателям позволит сократить стоимость работ в сравнении с наземными исследованиями и повысить их точность.

Ключевые слова: спутниковые снимки Landsat; ГИС; дистанционное зондирование Земли; городские и пригородные леса; дистанционный мониторинг лесов; тематическое картирование.

Введение. Городские леса являются неотъемлемым элементом ландшафта большинства городов мира. Они представляют собой своеобразные лесные экосистемы, которые по составу и структуре выполняют промежуточную функцию между естественными лесами и городскими парками. Общеизвестным фактом является то, что городские леса или «зе-

лёные зоны» выполняют охранные, рекреационные, культурно-оздоровительные и санитарно-гигиенические функции, являются местами отдыха населения [1, 2].

Согласно статье 102 Лесного кодекса Российской Федерации городские леса относятся к защитным лесам. В частности, к ним относятся леса, расположенные на землях городских поселений, предназна-

© Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Губаев А. В., Полевщикова Ю. А., Демишева Е. Н., Коптелов В. О., 2015.

Ссылка на статью: Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Губаев А. В., Полевщикова Ю. А., Демишева Е. Н., Коптелов В. О. Дистанционный мониторинг городских лесов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 1 (25). – С. 5-21.

ченные для отдыха населения, проведения культурно-оздоровительных и спортивных мероприятий, а также для сохранения благоприятной экологической обстановки. Согласно статье 133 Лесного кодекса РФ порядок ведения лесного хозяйства, а также использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов, расположенных на землях городских поселений, устанавливается органами государственной власти субъектов РФ в соответствии с Лесным кодексом РФ.

Между тем в связи с высокой температурой атмосферы и концентрацией выхлопных газов от транспорта, с уплотнением почв и ограниченным пространством роста в городских насаждениях деревья подвержены большому стрессу и нарушениям, чем произрастающие в обычных лесах [3]. Неблагоприятные условия роста также способствуют повышению восприимчивости городских лесов к вредителям и болезням, изменению климата и таким экстремальным явлениям, как кислотные дожди и загрязнение атмосферы [4]. Кроме того, на динамику развития городских лесов могут повлиять интродукция экзотических кустарников или деревьев, расширение городской застройки и транспортной инфраструктуры [5]. В связи с этим при проведении проектных работ по стратегическому планированию и хозяйственной деятельности, оценке и мониторингу за состоянием растительного покрова, а также сбору и систематизации информации о городских лесах уделяется особое внимание. Этому процессу способствует переход современных научно-прикладных исследований и принятие решений по устойчивому ведению лесного хозяйства на новый технологический уровень с использованием геоинформационных систем и данных дистанционного зондирования Земли [6–8]. Преимуществом новых технологий также является тот факт, что данные дистанционного зондирования обеспечивают временные и пространственные тренды в ис-

следованиях растительного покрова, которые необходимы при моделировании и планировании при застройке территории города [9].

Геоинформационные технологии и дистанционное зондирование Земли широко используют при оценке и мониторинге городских лесов во многих странах мира. В США по разновременным спутниковым снимкам Landsat на основе семи тематических классов методом общей классификации и пост-классификационного выявления изменений была получена карта динамики городских лесов нескольких городов штата Миннесота [10]. Оценку жизнеспособности городских лесов в стрессовых ситуациях проводят по изменениям спектральных значений (сигнатур) по индексу листовой поверхности растительности LAI (leaf area index). Ослабленные насаждения имеют более низкие значения сигнатур в ближней инфракрасной зоне спектра и повышенные в видимой зоне длин волн [11, 12].

В последние годы широкое применение при оценке городских лесов зон по спутниковым данным получило использование феномена «городского острова тепла» (Urban Heat Island), представляющего собой эффект более высоких температур атмосферы и поверхности земли в городах по сравнению с другими окружающими территориями. Этот феномен обусловлен большим количеством непроницаемых материалов, присущих городским зданиям, строениям и инфраструктуре, что позволяет фиксировать этот поток энергии при помощи сенсоров дистанционного зондирования [13]. Использование разновременных спутниковых снимков Landsat ETM+ и данных по температуре атмосферы города Джинан (Китай) с 1987 по 2011 гг., когда проходила его бурная урбанизация и миграция населения из сельской местности, позволило выявить существенную смену в землепользовании на городской территории и динамику интенсивности эффекта «острова тепла» для

различных районов города по месяцам и сезонам года [14].

Целью работы является апробирование методики анализа динамики пространственной структуры городских лесов по спутниковым снимкам, для чего решались следующие **задачи**:

- подбор и предварительная обработка спутниковых снимков среднего и высокого разрешений на город Йошкар-Ола за период с 1989 по 2014 гг;
- разработка тематических карт методом пошаговой неуправляемой классификации Isodata и выделение шести доминирующих классов наземного покрова на территорию исследования «городской округ г. Йошкар-Ола»;
- оценка степени фрагментации лесных участков на территории округа на основе ландшафтных показателей и выявление основных трендов в пространственной динамике городских лесов.

Объектом исследований явились леса «зелёной зоны», расположенные на территории города Йошкар-Олы Республики Марий Эл. Город расположен на территории Марийской низменности, находящейся в восточной части Восточно-Европейской равнины, в 50 км к северу от

реки Волги, на её левом притоке – реке Малая Кокшага. Городские леса расположены на территории муниципального образования «Город Йошкар-Ола» (рис. 1).

Зелёные насаждения являются частью городской инфраструктуры и экологическим каркасом этой территории, входят в единую систему взаимосвязанных элементов ландшафта города и прилегающего Медведевского района. К этому природному комплексу, имеющему статус особо охраняемой природной территории, также относятся на севере – лесопарк «Дубовая роща», а на юге лесопарк «Сосновая роща». Муниципальные городские леса г. Йошкар-Олы представляют собой высокопродуктивные насаждения смешанного породного состава и возраста, типологической структуры и отвечают требованиям организации многофункционального рекреационного лесопользования. Наиболее высокой рекреационной нагрузке подвержены участки зелёных зон, расположенные в непосредственной близости от городской застройки и транспортных коридоров. Для исследования был выбран участок городских лесов, включающий территорию общей площадью 10145 га [15].

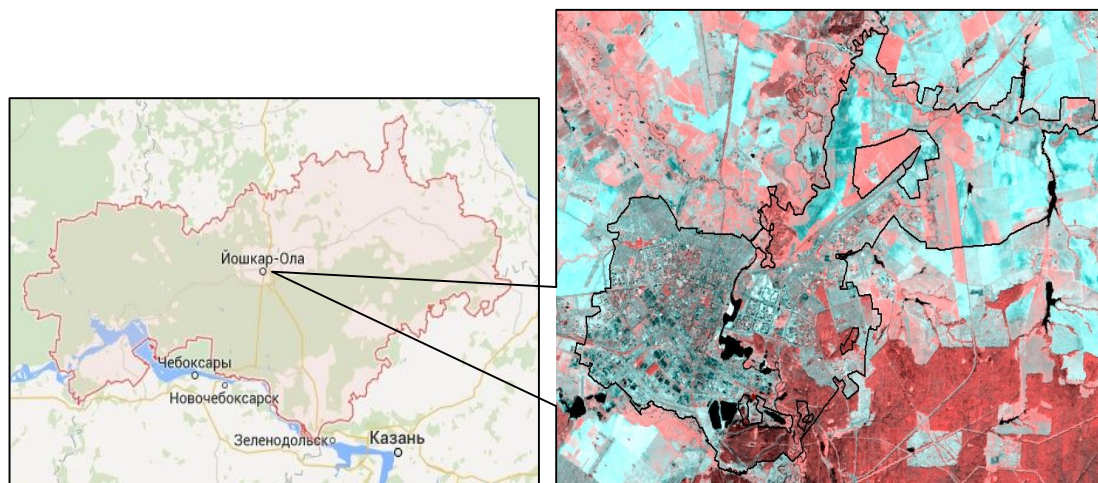


Рис. 1. Местоположение г. Йошкар-Олы на карте и на спутниковом снимке в псевдоцветах (Landsat 2001 г.)

Техника эксперимента и методика исследований. Предварительная подготовка изображений. Для оценки изменений растительного покрова (зелёных зон) в пределах границ городского округа были использованы безоблачные спутниковые снимки Landsat за три разновременных периода, полностью покрывающие территорию исследования. Всем спутниковым снимкам была присвоена геометрическая привязка UTM, zone 38 (табл. 1).

Работа со снимками проводилась в программных пакетах ENVI-5.2 и ArcGIS-10.3. Предварительная подготовка изображений включала: радиометрическую калибровку, геометрическую и атмосферную коррекцию изображений. До выполнения тематической классификации было проведено преобразование снимков с использованием метода «Tasseled Cap» («колпачок с кисточкой») [16]. Эта методика обычно применяется с целью анализа и выявления изменений наземного покрова на разновременных спутниковых изображениях, что позволяет повысить качество дешифрирования характеристик физических свойств растительности. Алгоритм «Tasseled Cap» представляет собой эмпирическое линейное преобразование шести каналов мультиспектрального изображения в три отдельных трансформированных изображения (яркость, зелёность и влажность), обычно используемых при изучении растительного покрова [17].

В основу формирования классов легенды для тематических карт была положена методика международного проекта NELDA (Northern Eurasia land dynamics analyses) и FAO (Food and Agricultural Organization), LCCS (Land Cover Classification

System) (<http://www.glcclccs.org>). Предложенная методика классификации наземного покрова позволяет сравнивать классы, независимо от масштаба, типа покрова, метода сбора данных и географического местоположения [18]. Использование этой методики позволяет унифицировать и приблизить стандарты классификаций, применяемые различными странами мира, и обеспечить их сопоставимость и сравнимость. Классификация наземного покрова по системе FAO LCCS предполагает формирование системы иерархичности классов легенды согласно господству жизненных форм. Преобладающие жизненные формы – это жизненные формы верхнего яруса, представленные как деревьями, так и кустарниками и травянистыми растениями. Иерархичность построения легенды классов заключается в том, что на высшей ступени находится класс «деревья» и далее по мере уменьшения значимости (от высоких к низким формам растительности) в структуре наземного покрова [19]. Другим важным классификатором является «покров» (cover), который может варьировать от сомкнутого до открытого (LCCS). При этом покров более 65 % относится к категории «сомкнутый», а покров в пределах 65 – 15 % к категории «открытый». Следует отметить, что, согласно вышеупомянутой легенде, участки с древесным покровом, не превышающим 15 %, будут отнесены к категории «лишённый растительности» и «покрытые редкой растительностью», если только преобладающая растительность не представлена травами или кустарником. Таким образом, формируются классы легенды всех возможных типов наземного покрова местности.

Таблица 1

Характеристика спутниковых данных

Спутник	Пространственное разрешение, м	Спектральный диапазон, мкм	Режим съёмки	Время съёмки (весенне-летний период)
Landsat 7	30	0,54–0,86	Мультиспектральный	1989 г.
Landsat 7	30	0,58–0,80	Мультиспектральный	2001 г.
Landsat 8	30	0,58–0,80	Мультиспектральный	2014 г.

В работе была сформирована векторная «маска» контура полигона объекта исследования, расположенная в пределах границ города Йошкар-Олы. При проведении экспертного анализа и оценки результатов классификации спутниковых снимков также использовались следующие материалы: топографические карты, планы лесонасаждений, кадастровые планы, снимки высокого разрешения и данные полевых исследований коллектива «Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов» ФГОУ ВПО «ПГТУ» за 2012–2014 гг. [20]. На основе вновь полученной «маски» векторного полигона по спутниковым снимкам Landsat были сформированы фрагменты изображений на территорию исследования за 1989, 2001 и 2014 гг. Тематическое картирование этих спутниковых изображений было проведено с использованием алгоритма неуправляемой классификации ISODATA в программном пакете ENVI-5.2. Для устранения смешивания классов наземного покрова, полученных при классификации и имеющих близкие спектральные характеристики, использовались методы пошаговой классификации с элементами выделения спектральных пороговых значений. Полученный в результате классификации набор исходных растровых тематических классов методом экспертного анализа был сгруп-

пирован в шесть доминирующих классов наземного покрова (табл. 2).

Пошаговая оценка точности классификации проводилась на основе коэффициентов матрицы различий (Confusion Matrix) и Каппа (Kappa Index). Для оценки точности тематического картирования городских лесов были использованы данные тестовых участков, заложенные во время полевых исследований территории, а также снимки высокого разрешения Каноус-В, Ресурс-П и RapidEye. Кроме того, применялись данные интернет-ресурсов «Яндекс карта» и «SAS Planet». Во время пост-классификационной обработки растровых данных была проведена генерализация полученных тематических слоёв за все временные периоды с использованием инструментов программного пакета ENVI-5.2 с заданным минимальным размером «окна фильтра» 3x3 пиксела.

Полученные для каждого временного периода шесть доминирующих растровых классов были преобразованы в полигональные векторные слои. Вся последующая работа по пространственному анализу и оценке изменений наземного покрова проводилась в среде ArcGis 10.3 с использованием полученных растровых и векторных слоёв на территорию исследования (рис. 2).

Таблица 2

Тематические классы наземного покрова городского округа

Классы наземного покрова	Описание	Код легенды
Хвойные насаждения	Вечнозелёная растительность	TNEC (tree needle leaved evergreen closed)
Лиственные и смешанные насаждения	Лиственные и смешанные насаждения, садовые участки, небольшие роци и лесопитомники	TBDC (tree broadleaved deciduous closed)
Сельскохозяйственные земли	Зерновые культуры, пастбища	HC (herbaceous closed)
Сооружения	Жилые и промышленные районы, транспортная сеть, городские коммуникации, смешанные городские и не покрытые растительностью земли, включающие различные типы сооружений	OB (open build)
Лишённые растительности	Каменные россыпи, песчаник, карьеры	BL (bare land)
Водные объекты	Постоянные открытые водоёмы, озёра, водохранилища, реки, бассейны	W (water)

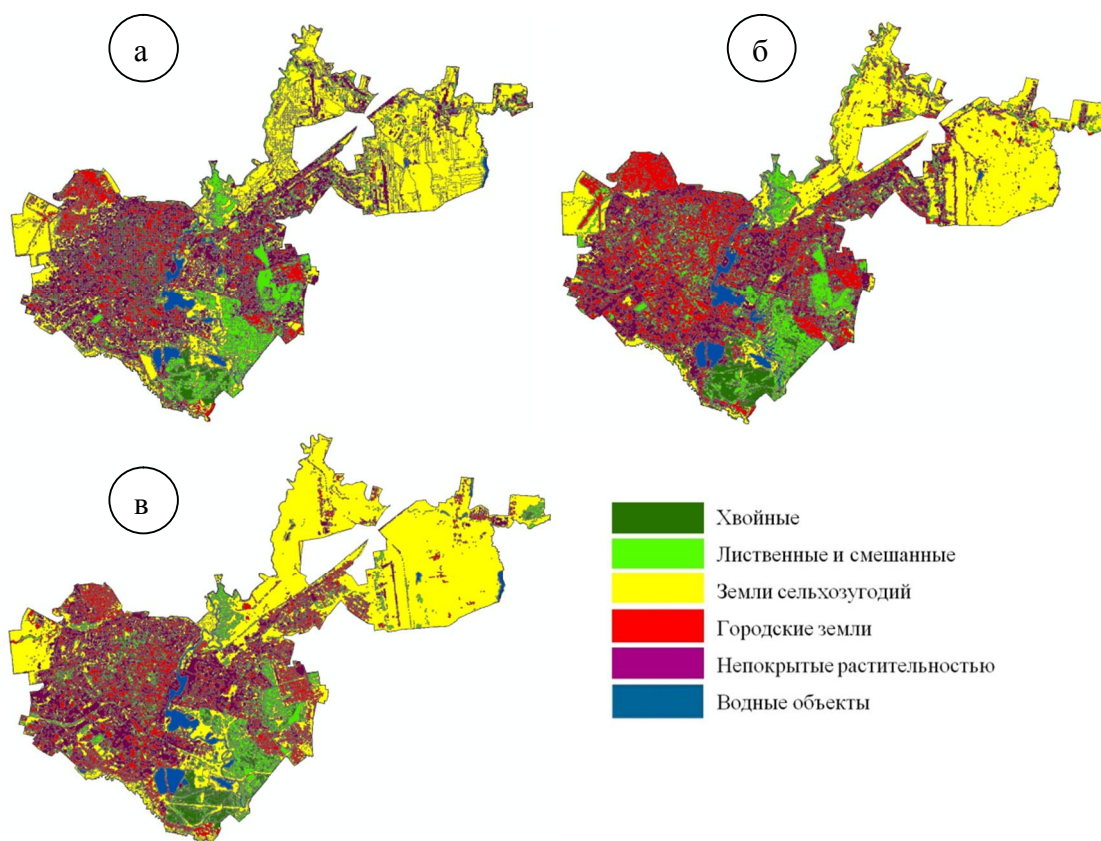


Рис. 2. Тематические карты наземного покрова г. Йошкар-Олы: а) 1989, б) 2001, в) 2014 гг.

Ландшафтные показатели. Статистический анализ пространственных изменений определялся при помощи основных ландшафтных показателей (индексов), описывающих характерные изменения в структуре участков зелёных зон (лесных участков) городского округа за изучаемый период времени: их размер и количество, периметр, сложность формы, а также степень делимости и пространственного распределения [21]. Определение этих и других индикаторов (табл. 3) было выполнено в модуле «Patch Analyst» геоинформационного пакета ArcGIS. Для оценки изменений зелёной зоны городского округа был использован полигональный тематический слой «лес», полученный в результате объединения двух доминирующих классов наземного покрова – «лиственные и смешанные насаждения» и «хвойные насаждения». Крупные лесные массивы (в основном ООПТ) оценивались по форме, площади распределения и по составу насаждений.

Индикаторы «средний размер участка» и «количество участков», представляя собой взаимосвязанные показатели, характеризуют динамику пространственного распределения фрагментов растительного покрова. По ним можно судить о степени раздробленности растительного покрова на мелкие или более крупные участки, а также о потере или приросте лесных участков на исследуемой территории.

Плотность границ (Edge density, ED) количественно характеризует границы растительного покрова или ландшафта, а также влияет на показатели микроклимата исследуемого участка и доступность к его ресурсам [22]. Этот показатель определяется как отношение длины границ опушки лесных участков к их площади. Увеличение значений этого показателя свидетельствует об антропогенном влиянии (рубка деревьев, транспортные коммуникации, строительство, линии электропередач и т.п.) на целостность растительного покрова.

Таблица 3

Индексы оценки фрагментации растительного покрова

Индексы	Обозначение	Расчётная формула	Единица измерения
Средний размер лесных участков	MPS	$MPS = a / NP$ а – площадь лесных участков	га
Количество лесных участков	NP	Общее количество всех лесных участков	шт.
Плотность границ лесных участков	ED	p / TLA TLA – площадь территории исследования, га р – периметр лесных участков	м/га
Индекс формы лесного участка	MSI	$MSI = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{0.25 p_{ij}}{\sqrt{a}} \right]}{NP}$ а – площадь лесных участков р – периметр лесных участков	Усл. ед.
Фрактальный индекс лесных участков	FRAC	$FRAC = \frac{2 \ln(0.25 p_i)}{a_i}$	Усл. ед.
Среднее расстояние между лесными участками	MNN	$MNN = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$ h – расстояние между центром лесного участка i и центром ближайшего соседнего участка n(NP) – общее количество лесных участков	(м)
Процент лесистости	PF	$PF = (a / TLA) * 100$	%

Средний индекс формы лесного участка (mean shape index, MSI), который определяется как отношение суммы периметра всех участков к площади всего растительного покрова исследуемой территории, также используется при описании степени фрагментации ландшафта. Он показывает отклонение формы оцениваемого объекта ландшафта от формы окружности [23]. Значение индекса формы варьирует от 0 (неправильная) до 1 (идеальная окружность).

Фрактальная величина (Fractal dimension) обычно используется для описания сложности и фрагментированности изучаемого участка ландшафта через соотношение периметр-площадь. Значения этого показателя лежат в пределах от 1 до 2. Значения стремятся к единице, когда участок имеет компактную прямоугольную форму с относительно небольшим пери-

метром по отношению к общей площади. Если участки имеют более высокую фрагментированность и состоят из сложных форм, то значение фрактальной величины увеличивается в связи с повышением значений периметра участков [24]. Индикатор «среднее расстояние до ближайшего соседа» (MNN, mean nearest neighbor), широко используемый в современной пространственной статистике, показывает степень изолированности участков ландшафта друг от друга.

В качестве основного объекта по оценке фрагментации растительного покрова исследуемой территории были приняты участки с минимальной площадью 0,27 га. Такие участки, расположенные на территории городского округа, на спутниковом снимке представляют собой группу пикселей класса «лес» (рис. 3).

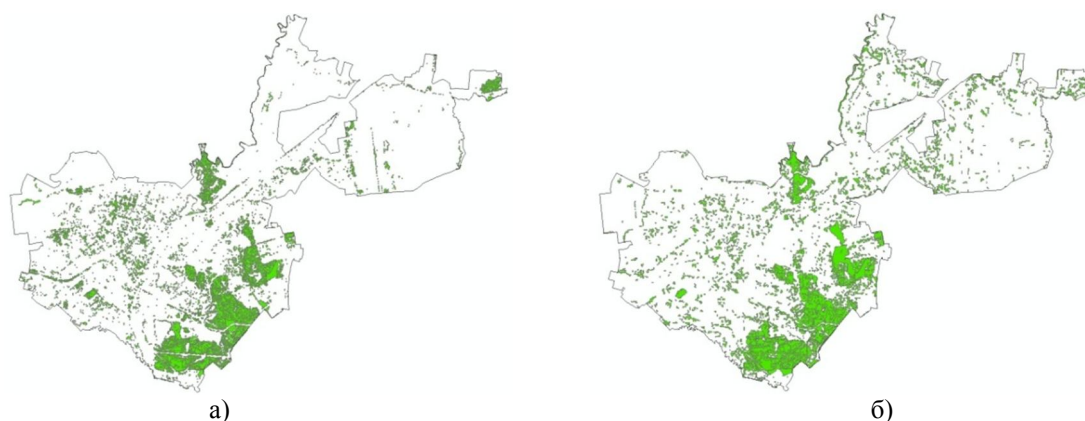


Рис. 3. Распределение лесных участков по территории г. Йошкар-Олы: а) 1989 г., б) 2014 г.

Результаты исследований. Общая точность классификации и Каппа-анализ для карт 1989, 2001 и 2014 гг. составил 88,2 % (74,8 %), 83,9 % (79,2 %) и 88,4 % (81,8 %) соответственно. Неуправляемая классификация на основе разновременных снимков Landsat 1989, 2001 и 2014 гг. и шести основных классов наземного покрова позволила выявить динамику растительного покрова города Йошкар-Олы. Анализ вновь полученных тематических карт показывает, что с 1989 года по настоящее время наблюдается устойчивое снижение площади зелёной зоны на территории исследований. Большая часть городских лесов была фактически переведена в класс «сооружения» и «лишённые растительности» земли. Детальный анализ тематических карт лесов зелёной зоны пригорода и города выявил незначительные изменения в площади хвойных лесов (TNEC)

(рис. 4). В то же время наблюдается существенное сокращение лиственных и смешанных насаждений (TBDC) с 1527,4 до 1069,3 га. На месте этих участков городской зоны были построены различные объекты и сооружения. Об этом также свидетельствует увеличение площади тематического класса «сооружения» (OB) с 2143,4 до 2395,7 га. В то же время площадь класса «лишённые растительности» (BL) снизилась с 2545,3 до 2336,5 га. Следует отметить, что два последних класса близки по своим спектральным характеристикам, что приводит к сложности их дешифрирования и выделения на спутниковом снимке. Значительно увеличилась площадь класса «сельскохозяйственные земли» (HC) за счёт перехода в него отдельных участков «лишённые растительности». Практически неизменными на территории исследования остались площади водных объектов.

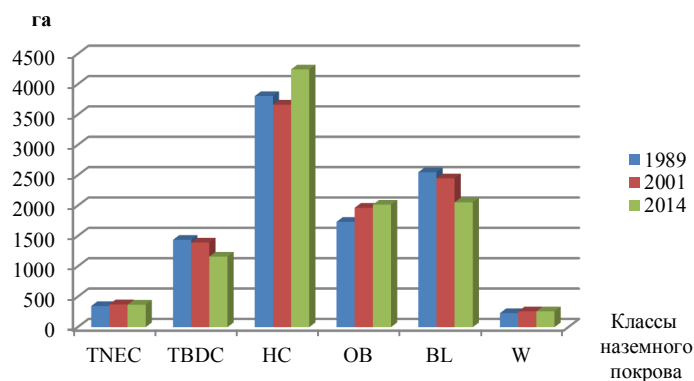


Рис. 4. Динамика площадей классов наземного покрова, расположенных на территории города Йошкар-Олы за период с 1989 по 2014 гг. (обозначения в тексте)

По районам городского округа также наблюдается различная картина динамики площадей наземного покрова, которая характерна для небольших городов Российской Федерации. В целом наблюдается относительно неизменная площадь участков «зелёных зон» в центральной части города (парки, небольшие скверы и аллеи). Развернувшееся за последнее десятилетие интенсивное строительство вдоль набережной зоны р. Малая Кокшага и вокруг неё не повлияло на общую картину ландшафта центральной части, ввиду отсутствия полноценных древесных насаждений вдоль береговой полосы и прилегающей территории, которые необходимо было вырубить в связи со строительными работами. Между тем, совершенно другая картина наблюдается в периферийной части городского округа. Выявлены потери в городских лесах в южном промышленном, заречном и сельском

районах (рис. 5). Отчасти это может быть связано с интенсивным строительством жилья, включая индивидуальную коттеджную застройку, которая проводится на этой территории последние 20 лет. Особенно эта тенденция заметна на примере сельского района, в котором произошло снижение растительного покрова более чем наполовину (рис. 5, 6). Между тем в заводском районе наблюдается незначительное увеличение площади растительного покрова (зелёных зон), что может быть связано с сукцессионными процессами на заброшенных землях сельхозугодий (залежи) [25]. Естественные процессы зарастания земель запаса и перераспределения лесной растительностью продолжаются в Республике Марий Эл уже второе десятилетие. На этих землях происходит формирование высокополнотных и продуктивных берёзовых и сосновых насаждений.

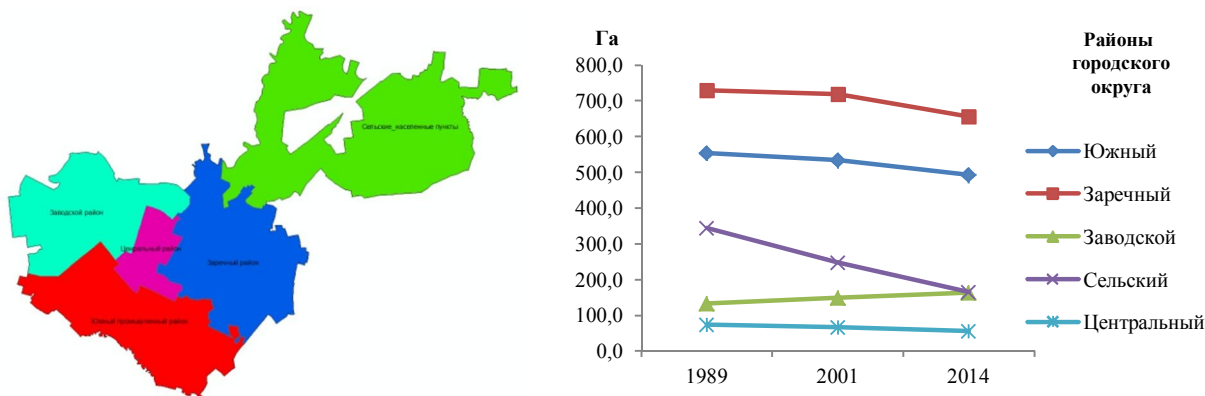


Рис. 5. Динамика площадей растительного покрова по различным районам г. Йошкар-Олы

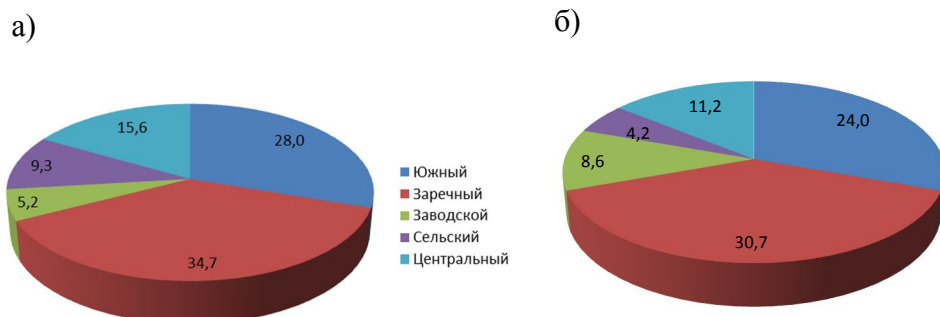


Рис. 6. Площади растительного покрова (процент лесистости) по районам г. Йошкар-Олы: а) 1989 г., б) 2014 г.

Анализ вновь полученных тематических карт на территорию г. Йошкар-Олы показал неоднородность структуры её лесных участков. Заметно выделяются крупные лесные участки в юго-восточной и центральной части городского округа, которые сильно влияют на общий тренд динамики ландшафтных показателей. Относительно неизменными остаются территории лесопарковых зон, включающие в себя насаждения южной и северной частей городской зоны (парки, скверы и аллеи).

По результатам исследований были выявлены следующие тенденции в изменении растительного покрова территории городского округа за 1989 – 2014 гг.:

- средний размер лесного участка (MPS) за эти годы существенно снизился с 0,9 до 0,58 га (рис. 7, а);

- произошло увеличение количества лесных участков с 1865 до 1998 (рис. 7, б). В то же время число лесных участков площадью более 2 га существенно снизилось в 2014 году по сравнению с 1989 годом;

- показатель плотности границ всех лесных участков повысился с 0,06 до 0,07 м/га (рис. 7, в), что свидетельствует об увеличении антропогенной нагрузки на городские леса;

- индекс формы лесного участка (MSI) за исследуемый период времени изменился почти в два раза. Его значение варьировало от 0,22 в 1998 году до 0,12 в 2014 году (рис. 7, г);

- индекс фрактальной величины увеличился с 1,51 до 1,81 единицы (рис. 7, д);

- показатель степени изолированности лесных участков (MNN) (рис. 7, е) также имеет тенденцию к росту;

- лесистость также имеет явную тенденцию к снижению с 17,5 % в 1989 году до 14,7 % в 2014 году.

Полученные ландшафтные индикаторы для городских лесов Йошкар-Олы говорят о том, что пространственное рас-

пределение участков растительного покрова приобретает всё более фрагментированный характер. Динамика в сторону повышения индикаторов MNN (среднего расстояния), плотности границ, индекса формы и количества участков с 1989 по 2014 гг. также свидетельствует об этом процессе. В целом наблюдается явное сокращение площади городских лесов и увеличение степени изолированности отдельных участков растительного покрова, что в будущем увеличит риски их нарушений при постоянно возрастающей антропогенной нагрузке. Поэтому для повышения устойчивости городских лесов требуются хозяйственные мероприятия по стабилизации фрагментированности участков, либо даже снижению этого показателя ландшафта.

Ещё одним важным индикатором при мониторинге, характеризующем степень доминирования городских сооружений над зелёной зоной, является показатель соотношения площади класса «сооружения» к площади «растительность». К первой категории относятся жилые постройки, промышленные участки, транспортные коммуникации, открытые участки (карьеры, объекты ТБО и пр.). Класс «растительность» включает в себя все участки зелёной зоны города (растительный покров). Этот показатель также наглядно демонстрирует устойчивую тенденцию за исследуемый период времени к росту доминирования искусственных объектов над растительностью в пределах исследуемой территории (рис 8, 9). Этот показатель подтверждает тот факт, что увеличение степени фрагментации зелёных зон в основном произошло за счёт увеличения класса «сооружения». Следует отметить, что схожие тенденции по соотношению площади застройки и растительного покрова характерны также для большинства городов Европейского союза [26].

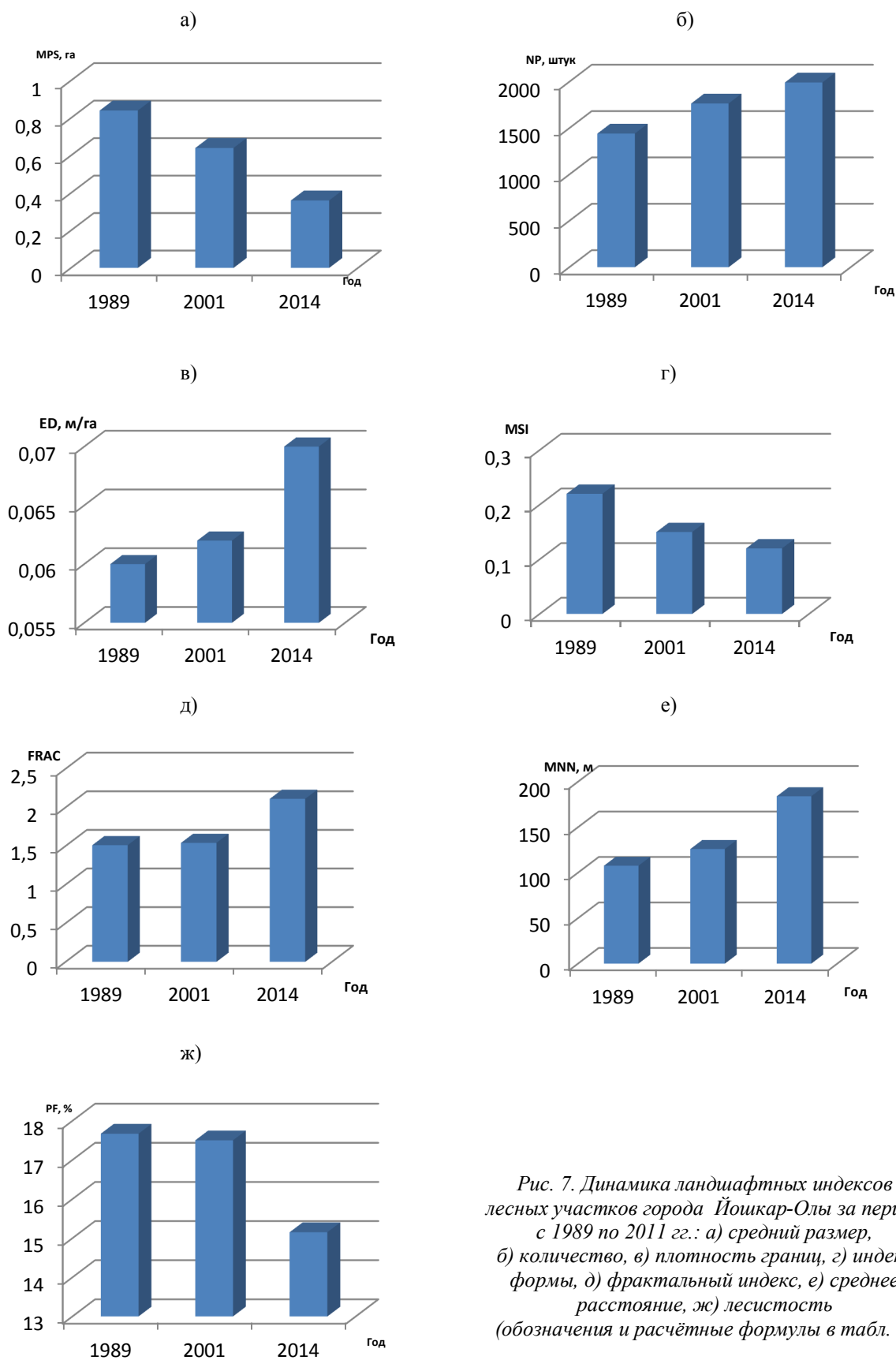


Рис. 7. Динамика ландшафтных индексов лесных участков города Йошкар-Олы за период с 1989 по 2011 гг.: а) средний размер, б) количество, в) плотность границ, г) индекс формы, д) фрактальный индекс, е) среднее расстояние, ж) лесистость (обозначения и расчётные формулы в табл. 3)

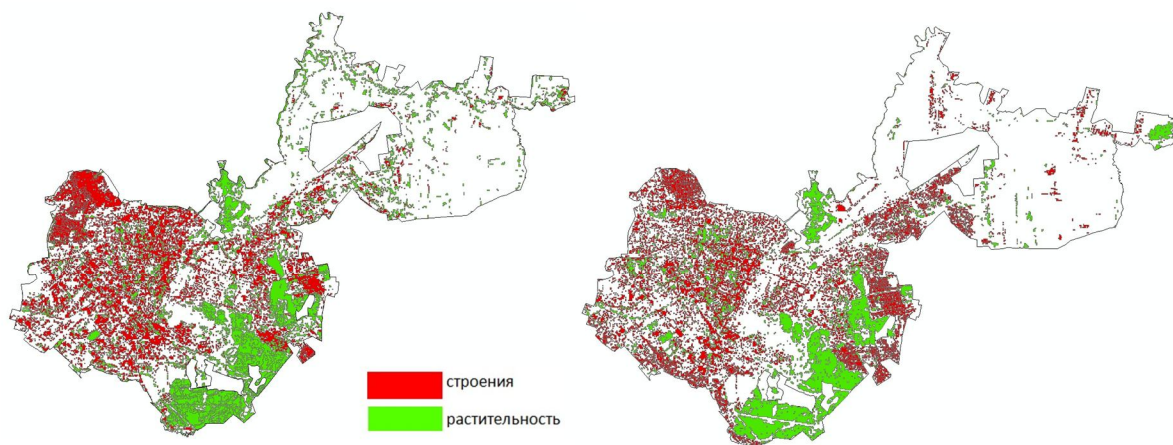


Рис. 8. Динамика изменений класса «сооружения» и класса «растительность» за 1989–2014 гг.

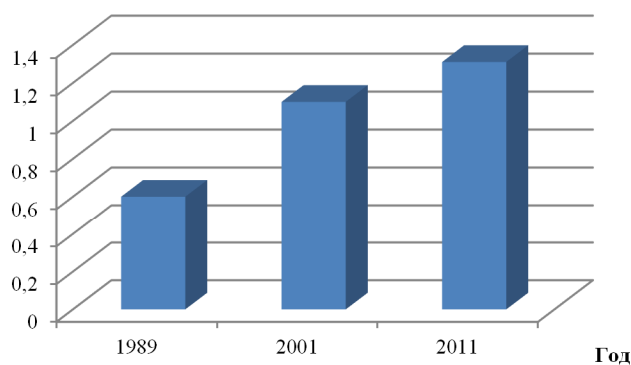


Рис. 9. Индекс соотношения класса «сооружения» и класса «растительность» за 1989–2014 гг.

На отдельных участках городского ландшафта наблюдается ухудшение санитарного состояния растительного покрова. Тем не менее, в целом растительность адаптирована к городским условиям и представляет собой относительно устойчивую лесную экосистему. К сожалению, процесс урбанизации влечёт за собой негативные последствия на городские леса в целом. Повышение рекреационной нагрузки на основные лесные массивы и «островки зелёных зон» приводит к потере целостности городских лесов, что и подтверждается нашими исследованиями.

Выводы

1. В работе показана возможность использования разновременной спутниковой информации для мониторинга растительного покрова г. Йошкар-Олы, что может повысить эффективность при приня-

тии решений в городском планировании. При этом важным моментом предложенного метода мониторинга является комплексное использование спутниковых снимков среднего (Landsat) и высокого разрешений (Канопус, Rapid Eye).

2. В основе методики исследований лежит неуправляемая классификация разновременных спутниковых снимков, которая обеспечивает высокую степень точности тематического картирования до 88 %. Для оценки изменений городских лесов выделены шесть основных классов наземного покрова.

3. Применение ландшафтных индексов и данных дистанционного зондирования показывает хорошие результаты при оценке растительного покрова городских лесов. За последние 25 лет в городских лесах пространственное распределение

участков растительного покрова приобретает всё более фрагментированный характер. Динамика в сторону повышения индикаторов MNN (среднего расстояния), плотности границ, индекса формы и количества участков с 1989 по 2014 гг. также свидетельствует об этом процессе.

Работа выполнена по проекту «Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем» в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации 2014 г.

Список литературы

1. Мозолевская, Е.Г. Оценка состояния и устойчивости лесов зеленой зоны города Тольятти / Е.Г. Мозолевская, Е.П. Кузьмичев, Н.М. Шленская и др. – М.: ИЭВБ РАН. – 1995. – 92 с.
2. Konijnendijk, C.C. Urban Forests and Trees / C.C. Konijnendijk, K. Nilsson, T.B. Randrup, J. Schipperijn. – Berlin: Springer, 2005. – 520 p.
3. Flint, H.L. Plants showing tolerance of urban stress / H.L. Flint // Journal of Environmental Horticulture. – 1985. – № 3. – Pp. 85–89.
4. Metzger, J.M. The effect of crown dimensions on transparency and the assessment of tree health / J.M. Metzger, R. Oren // Ecological Applications. – 2001. – № 11. – Pp. 1634–1640.
5. Dwyer, J.F. Sustaining urban forests / J.F. Dwyer, D.J. Nowak, M.H. Nobel // Journal of Arboriculture. – 2003. – № 29. – Pp. 49–55.
6. Курбанов, Э.А. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 1(21). – С. 18–32.
7. Kathleen, T.W. Geospatial methods provide timely and comprehensive urban forest information / T. W. Kathleen, G.R. Johnson // Urban Forestry and Urban Greening. – 2007. – № 6. – Pp. 15–22.
8. Нурғалиев, И.С. Космические образовательные технологии: инвестиции в будущее / И.С. Нурғалиев, Д.С. Стребков, И.И. Тюхов, А.М. Шахраманьян // Труды международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». – 2010. – Т. 1. – С. 406–412.
9. Воробьев, О.Н. Мониторинг состояния растительного покрова на территории Республики Марий Эл с использованием ENVISAT MERIS / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2013. – № 7(99). – С. 42–45.
10. Yuan, F. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing / F. Yuan, K.E. Sawaya, B.C. Loeffelholz, M.E. Bauer // Remote Sensing of Environment. – 2005. – № 98. – Pp. 317–328.
11. Jensen, R.R. Estimating urban leaf area using field measurements and satellite remote sensing data / R.R. Jensen, J.H. Perry // Journal of Arboriculture. – 2005. – № 31(1). – Pp. 21–27.
12. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг лесных гарей в Марийском Заволжье / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2012. № 1 (15). — С. 12–22.
13. Voogt, J.A. Thermal Remote Sensing of Urban Climates / J.A. Voogt, T.R. Oke // Remote Sensing of Environment. – 2003. – № 86. – Pp. 370–384.
14. Meng, F. Remote-sensing image-based analysis of the patterns of urban heat islands in rapidly urbanizing Jinan, China / F. Meng, M. Liu // International Journal of Remote Sensing. – 2013. – № 34(24). – Pp. 8838–8853.
15. Публичная кадастровая карта [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://maps.rosreestr.ru/PortalOnline> (дата обращения 08.03.2015).
16. Курбанов, Э.А. Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Незамаев и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2013. – № 3 (19). – С. 72–82.
17. Healey, S.P. Comparison of Tasseled Cap-Based Landsat Data Structures for Use in Forest Disturbance Detection / S.P. Healey, W.B. Cohen, Y. Zhiqiang, O. Krankina // Remote Sensing of Environment. – 2005. – № 97. – Pp. 301–310.
18. Система классификации земного покрова (LCCS): Понятия классификации и руководство пользователя / Организация ООН по вопросам продовольствия и сельского хозяйства. – Рим, 2005. – 108 с.
19. Губаев, А.В. Мониторинг и прогнозирование состояния лесных насаждений методами дистанционного зондирования / А.В. Губаев, Э.А.

Курбанов, О.Н. Кранкина, О.Н. Воробьев // Влияние аномальной погоды на природные, социально-экономические и искусственные системы: засуха 2010 года в Поволжье России: материалы международной научной конференции NASA и семинара GOFC-GOLD/NEESPI [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2012. – С. 92-98. – URL: <http://csfm.marstu.net/publications.html> (режим доступа 18.03.2015).

20. Воробьев, О.Н. Методика выявления степени повреждения древостоев после пожаров 2010 года в Среднем Поволжье / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, С.А. Лежнин, и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – № 4 (11). – С. 217-229.

21. Krummel, J.R. Landscape Patterns in a Disturbed Environment / J.R. Krummel, R.H. Gardner, G. Sugihara et al // Oikos. – 1987. – Vol. 4, № 3. – Pp. 321-324.

22. Brown, D.G. Estimating Error in an Analysis of Forest Fragmentation Change Using North American Landscape Characterization (NALC) Data /

D.G. Brown, J.D. Duh, S.A. Drzyzga // Remote sensing of environment. – 2000. – № 7. – Pp. 106-107.

23. Ohman, K. Reducing forest fragmentation in long-term forest planning by using the shape index / K.Ohman, T. Lamas // Forest Ecology and Management. – 2005. – № 212. – Pp. 346-357.

24. Herold, M. The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses / M. Herold, J. Scepán, K.C. Clarke // Environment and Planning. – 2002. – № 34. – Pp. 1443-1458.

25. Курбанов, Э.А. Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев и др. // Вестник Марийского государственного технического университета Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2010. – № 2 (9). – С. 14-20

26. Kasanko, M. Are European cities becoming dispersed? A comparative analysis of 15 European urban areas / M. Kasanko, J.I.Barredo, C. Lavalle, et al. // Landscape and Urban Planning. – 2006. – № 77. – Pp. 111–130.

Статья поступила в редакцию 09.02.15.

Информация об авторах

ВОРОБЬЕВ Олег Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС, депонирование углерода лесными экосистемами, мониторинг лесных экосистем. Автор 50 научных и учебно-методических работ. E-mail: vorobievon@volgatech.net

КУРБАНОВ Эльдар Аликрамович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, руководитель международного Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – устойчивое управление лесами, дистанционное зондирование земли и ГИС, биологическая продуктивность лесных экосистем, депонирование углерода лесными экосистемами, леса Киото. Автор 130 научных и учебно-методических работ. E-mail: kurbanovea@volgatech.net

ГУБАЕВ Александр Владимирович – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли и ГИС, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 20 публикаций. E-mail: galex@volgatech.net

ПОЛЕВЩИКОВА Юлия Александровна – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли и ГИС, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 20 публикаций. E-mail: polevshikovaya@volgatech.net

ДЕМИШЕВА Екатерина Николаевна – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС, оценка загрязненных территорий. Автор пяти публикаций. E-mail: kls@volgatech.net

КОПТЕЛОВ Василий Олегович – магистрант кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС, экология. E-mail: koptelovvo@volgatech.net

UDK 630*583

REMOTE MONITORING OF URBAN FORESTS

**O. N. Vorobyev, E. A. Kurbanov, A. V. Gubayev, Y. A. Polevshikova,
E. N. Demisheva, V. O. Koptelov**

Volga State University of Technology,
3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation
E-mail: vorobievon@volgatech.net

Key words: Landsat satellite images; GIS; remote sensing; urban forests; remote monitoring of forests; thematic mapping.

ABSTRACT

The *aim* of the research was to carry out the comparative analyses of changes in spatial structure of Yoshkar-Ola city's urban forests between 1989 and 2014. To fulfill this aim several tasks were accomplished: finding out and processing of satellite images of middle and high resolutions on the territory of the city Yoshkar-Ola; elaboration of thematic maps with the use of ISODATA unsupervised classification and allocation of 6 main dominant classes of land cover on the investigated territory; estimation the degree of fragmentation on the territory of Yoshkar-Ola on the base of landscape metrics and detection of main spatial dynamics of urban forests. The paper also explores eligibility of a landscape metrics for the estimation of spatial distribution of Yoshkar-Ola urban forests for the 1981, 2001 and 2014 with the use of remote sensing. In the research we used archival Landsat images, map and plan of the city, satellite data Canopus and Rapid Eye of higher spatial resolution. The analyses of newly obtained multi temporal thematic maps on the territory of the city district of Yoshkar-Ola show the structure heterogeneity of the forest patches. There is sufficient allocation of large forest areas in the south-eastern and central part of the urban district, which strongly affect the general trend of the dynamics of landscape metrics. The findings suggest that over the past 25 years on the investigated territory there is an increase in fragmentation of single patches of urban forests, and a significant reduction in the class of deciduous and mixed forest stands from 1527.4 ha to 1069.3 ha. Also there was an increase in number of forest patches from 1865 in 1989 to 1998 in 2014, while the mean size of the patches was decreased from 0.9 to 0.58 ha. The thematic mapping of the Landsat images showed that the accuracy assessment of the forest cover classification with such processes varies between 83 % and 88 %. The proposed method of thematic mapping and evaluation of urban forests with the use of remote sensing has good potential to frequent update of the required data while reducing costs compared to field sampling. The research also shows the significance of the use of spatial measurements and landscape metrics that can contribute to more detail thematic mapping of the urban forests.

The research was carried out under the project «Remote Monitoring of Forest Ecosystems Sustainability» as the State Task in Science Activity of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in 2014.

REFERENCES

1. Mozolevskaya E.G., Kuzmichev E.P., Shlenskaya N.M., et al. *Otsenka sostoyaniya i ustoychivosti lesov zelenoy zony goroda Tolyatti* [Assessment of State and Sustainability of Tolyatti Forests]. Moscow: IEBV RAN. 1995. 92 p.
2. Konijnendijk C.C., Nilsson K., Randrup T.B., Schipperijn J. *Urban Forests and Trees*. Berlin: Springer, 2005. 520 p.
3. Flint H.L. Plants showing tolerance of urban stress. *Journal of Environmental Horticulture*. 1985. № 3. Pp. 85–89.
4. Metzger J.M., Oren R. The effect of crown dimensions on transparency and the assessment of tree health. *Ecological Applications*. 2001. № 11. Pp. 1634–1640.
5. Dwyer J.F., Nowak D.J., Nobel M.H. Sustaining urban forests. *Journal of Arboriculture*. 2003. № 29. Pp. 49–55.
6. Kurbanov E.A., Vorobev O.N., Gubaev A.V., et al. Chetyre desyatiletiiya issledovaniy lesov po snimkam Landsat [Four Decades for Forests Study by Landsat Images]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2014. № 1(21). Pp. 18-32.

7. Kathleen T.W., Johnson G.R. Geospatial methods provide timely and comprehensive urban forest information. *Urban Forestry and Urban Greening*. 2007. № 6. Pp. 15–22.
8. Nurgaliev I.S., Strebkov D.S., Tukhov I.I., Shakhramanyan A.M. Kosmicheskie obrazovatelnye tekhnologii: investitsii v budushchee [Space Organizational Technologies: Investments into the Future]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energoobespechenie i energosberezhenie v selskom khozyaystve»* [Proceedings of International Research and Technical Conference «Energy Supply and Energy Saving in Agriculture»]. 2010. Vol. 1. Pp. 406-412.
9. Vorobev O.N., Kurbanov E.A. Monitoring sostoyaniya rastitelnogo pokrova na territorii Respubliki Mariy El s ispolzovaniem ENVISAT MERIS [Monitoring of Plant Cover Condition in the Republic of Mari El Using ENVISAT MERIS]. *Vestnik MGUL – Lesnoy vestnik* [Vestnik of MSFU – Forest Vestnik]. 2013. № 7(99). Pp. 42–45.
10. Yuan F., Sawaya K.E., Loeffelholz B.C., Bauer M.E. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Met-ropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 2005. № 98. Pp. 317 – 328.
11. Jensen R.R., Perry J.H. Estimating urban leaf area using field measurements and satellite remote sensing data. *Journal of Arboriculture*. 2005. № 31(1). Pp. 21-27.
12. Vorobev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V., et al. Distantionnyy monitoring lesnykh garey v Mariyskom Zavolzh'e [Remote Monitoring of Forest Fire-Sites in Mari Trans-Volga Region]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie*. [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2012. № 1 (15). Pp. 12-22.
13. Voogt J.A., Oke T.R. Thermal Remote Sensing of Urban Climates. *Remote Sensing of Environment*. 2003. № 86. Pp. 370–384.
14. Meng F., Liu M. Remote-sensing image-based analysis of the patterns of urban heat islands in rapidly urbanizing Jinan, China. *International Journal of Remote Sensing*. 2013. № 34(24). Pp. 8838-8853.
15. Publichnaya kadaastrovaya karta [Public Cadastral Map]. URL: <http://maps.rosreestr.ru/PortalOnline> (Reference date 08.03.2015).
16. Kurbanov E.A., Vorobev O.N., Nezamaev S.A., et al. Tematicheskoe kartirovanie i stratifikatsiya lesov Mariyskogo Zavolzhya po sputnikovym snimkam Landsat [Thematic Mapping and Stratification of the Mari Trans-Volga Region Forests by Satellite Images Landsat]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie*. [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2013. № 3 (19). Pp. 72-82.
17. Healey S.P., Cohen W.B., Zhiqiang Y., Krankina O. Comparison of Tasseled Cap-Based Landsat Data Structures for Use in Forest Disturbance Detection. *Remote Sensing of Environment*. 2005. № 97. Pp. 301 – 310.
18. Sistema klassifikatsii zemnogo pokrova (LCCS): Ponyatiya klassifikatsii i rukovodstvo polzovatelya [Land Cover Classification System (LCCS): An Idea about Classification and User Guide]. *Organizatsiya OON po voprosam prodovolstviya i selskogo khozyaystva* [Food and Agriculture Organization of the United Nations]. Rome. 2005. 108 p.
19. Gubaev A.V., Kurbanov E.A., Krankina O.N., Vorobev O.N. Monitoring i prognozirovaniye sostoyaniya lesnykh nasazhdeniy metodami distantionnogo zondirovaniya [Monitoring and Prognostication of Forest Stands Condition by Remote Sensing]. *Vliyaniye anomalnoy pogody na prirodnye, sotsialno-ekonomicheskie i iskusstvennyye sistemy: zasukha 2010 goda v Povolzhe Rossii: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii NASA i seminar GOF-C-GOLD/NEESPI* [Influence of Abnormal Weather on the Natural, Social and Economic and Artificial Systems: Drought – 2010 in Volga Region: proceedings of International Research Conference NASA and seminar GOF-C-GOLD/NEESPI]. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2012. P. 92-98. URL: <http://csfm.marstu.net/publications.html> (Reference date 18.03.2015).
20. Vorobev O.N., Kurbanov E.A., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., et al. Metodika vyyavleniya stepeni povrezhdeniya drevostoev posle pozharov 2010 goda v Srednem Povolzhe [A Methods to Reveal the Damage Level of Trees after Fires - 2010 in the Middle Volga Region]. *Sovremennyye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Present-Day Problems of the Earth Remote Sensing out from the Space]. № 4 (11). 2014. Pp. 217-229.
21. Krummel J.R., Gardner R.H., Sugihara G. Landscape Patterns in a Disturbed Environment. *Oikos*. 1987. Vol. 4, № 3. Pp. 321-324.
22. Brown D.G., Duh J.D., Drzyzga S.A. Estimating Error in an Analysis of Forest Fragmentation Change Using North American Landscape Characterization (NALC) Data. *Remote sensing of environment*. 2000. № 7. Pp. 106-107.
23. Ohman K., Lamas T. Reducing forest fragmentation in long-term forest planning by using the shape index. *Forest Ecology and Management*. 2005. № 212. Pp. 346-357.
24. Herold M., Scepan J., Clarke K.C. The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses. *Environment and Planning*. 2002. № 34. Pp. 1443-1458.
25. Kurbanov E.A., Vorobev O.N., Gubaev A.V., et al. Otsenka zarastaniya zemel zapasa Respubliki Mariy El lesnoy rastitelnostyu po sputnikovym snimkam [An Analysis of Mari El Reserve Lands Coloni-

zation by Forest Vegetation Using Satellite Images]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopozovanie*. [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2010. № 2 (9). Pp. 14-20

26. Kasanko M., Barredo J.I., Lavalle C., McCormick N., Demicheli L., Sagris V., Brezger A. Are European Cities Becoming Dispersed? A Comparative Analysis of 15 European Urban Areas. *Landscape and Urban Planning*. 2006. № 77. P. 111–130.

The article was received 09.02.15.

Citation for an article: Vorobyev O. N., Kurbanov E. A., Gubayev A. V., Polevshikova Y. A., Demisheva E. N., Koptelov V. O. Remote monitoring of urban forests. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2015. No 1 (25). Pp. 5-21.

Information about the authors

VOROBYEV Oleg Nikolayevich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Chair of Silviculture and Forest Inventory, Volga State University of Technology. Research interests – forest remote sensing and GIS, carbon sequestration by the forest ecosystems, forest ecosystems monitoring. The author of 50 scientific publications and textbooks. E-mail: vorobievon@volgatech.net

KURBANOV Eldar Alikramovich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Chair of Silviculture and Forest Inventory, Head of the Centre of Sustainable Forest Management and Remote Sensing, Volga State University of Technology. Research interests – sustainable forest management, remote sensing and GIS, biological productivity of forest ecosystems, carbon sequestration by the forest ecosystems, Kyoto forests. The author of 130 scientific publications and textbooks. E-mail: kurbanovea@volgatech.net

GUBAYEV Aleksandr Vladimirovich – PhD student of the forestry department of Volga State University of Technology. Research interest – forest remote sensing and GIS, biological productivity of forest ecosystems. The author of 20 research publications. E-mail: galex@volgatech.net

POLEVSHCHIKOVA Yuliya Alexandrovna – PhD student at the Chair of Silviculture and Forest Inventory, Volga State University of Technology. Research interest – remote sensing and GIS, biological productivity of forest ecosystems. The author of 20 publications. E-mail: polevshikovaya@volgatech.net

DEMISHEVA Ekaterina Nikolayevna – PhD Student at the Chair of Silviculture and Forest Inventory, Volga State University of Technology. Research interest – forest remote sensing, assessment of contaminated and polluted lands. The author of 5 research publications. E-mail: kls@volgatech.net

KOPELOV Vasily Olegovich – master student of the forestry department of Volga State University of Technology. Research interest – forest remote sensing and GIS, ecology. E-mail: koptelovvo@volgatech.net