

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ. БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 630*583

МЕТОДИКА ПОШАГОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ДЛЯ ТЕМАТИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ ЛЕСОВ

О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов, А. В. Губаев, Е. Н. Демишева

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

В работе представлена методика пошаговой классификации спутниковых снимков среднего пространственного разрешения для тематического картирования лесного покрова на основе подходов международных организаций ФАО, НАСА и Российской государственной инвентаризации лесов. Для исследований использованы архивные снимки спутника Landsat 2001 и 2014 гг. Получены закономерности распределения тематических классов (страт) лесного покрова по спектральным сигнатурам спутниковых изображений Landsat в векторном «пространстве признаков». Близкие значения спектральных сигнатур показали спелые и средневозрастные лесные насаждения, что приводит к смешиванию классов в процессе классификации спутниковых снимков. Максимальную спектральную разделимость показали основные лесные классы TNEC_МаО (хвойные сомкнутые спелые и перестойные), ТВДС_МаО (лиственные сомкнутые спелые и перестойные) и ТМС_МаО (смешанные спелые перестойные). Анализ вновь полученных разновременных тематических карт на территорию Среднего Поволжья показал снижение площади класса TNEC_МаО на 2,8 %. Одновременно по тематическим картам 2001 и 2014 гг. наблюдается незначительное увеличение классов TNEC_M (светлохвойные средневозрастные среднепроизводительные) на 2,3 %, TNEO_W (мелколиственные спелые и перестойные среднепроизводительные) на 0,6 %. Результаты исследования могут быть использованы при осуществлении лесного мониторинга методами дистанционного зондирования.

Ключевые слова: спутниковые снимки; ГИС; дистанционное зондирование; классификация; дистанционный мониторинг лесов; тематическое картирование.

Введение. В течение последних трёх десятилетий произошло существенное увеличение числа космических спутников и программных средств, обеспечивающих уникальную информацию и методы для работы с тематической информацией о состоянии земного покрова [1–3]. Эти данные позволили повысить точность

прогнозирования и мониторинга за многочисленными процессами на Земле [4, 5]. В частности, спутниковые снимки широко используются для оценки и мониторинга изменений в атмосфере, поверхности океанов, полярных территорий, сельскохозяйственных земель, городских территорий, пустынь и горных массивов. Изобра-

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

Для цитирования: Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Губаев А. В., Демишева Е. Н. Методика пошаговой классификации спутниковых снимков для тематического картирования лесов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 4 (28). – С. 57-72.

жения, полученные с помощью системы спутников Landsat, широко востребованы научными коллективами, занимающимися тематическим картированием и мониторингом растительного покрова [6].

Несколько исследований были проведены с целью картирования отдельных деревьев и их групп по снимкам Landsat и Spot [7, 8]. Методика работ основывалась на комбинации спектрального анализа, сегментации и оценки шести спектральных диапазонов. Среди других разработок по картированию растительного покрова Северной Евразии следует отметить карту земной поверхности SPOT-VEGETATION, выполненной коллективом Института космических исследований РАН [9, 10]. Картирование предгорной и горной частей бассейна реки Кожим (Приполярный Урал) и Югорского полуострова проведено на основе анализа контуров доминирующих классов растительного покрова по спутниковым снимкам Landsat, Aster и Spot [11, 12]. Индексы NDVI и NDBI были успешно применены для дешифрирования урбанизированных территорий и оценки состава лесов [13, 14].

При картировании растительного покрова прогнозные модели изменений землепользования в значительной степени зависят от выбора пространственного масштаба [15, 16]. В большинстве случаев в таких работах основным методическим решением является приближение (сопряжение) переменных экосистемы с уровня полевых исследований до уровня ландшафта или региона [17, 18].

Несмотря на большое количество публикаций по тематическому картированию за рубежом и на глобальном уровне, региональные оценки в России остаются важными при решении проблем мониторинга и валидации [19–21] создаваемых продуктов путём совмещения данных среднего и высокого разрешений. Важность поставленной проблемы также обусловливается международными соглаше-

ниями по изменению климата, инвентаризацией стоков парниковых газов и снижением их эмиссии, а также сохранением биоразнообразия экосистем [22, 23].

Цель работы – разработать методику пошаговой классификации для тематического картирования лесного покрова по разновременным спутниковым снимкам среднего пространственного разрешения, для достижения которой решены следующие **задачи**:

- совершенствовать методику пошагового анализа классификации лесного покрова по спутниковым снимкам, используя подходы международных организаций ФАО, НАСА и российской ГИЛ (Государственная инвентаризация лесов);
- осуществить последовательность процедур по обработке серии спутниковых снимков среднего пространственного разрешения для проведения мониторинга лесного покрова на примере субъектов федерации в Среднем Поволжье России.

Объект исследований. Апробация методики была проведена на территории Среднего Поволжья, в которую вошли республики Марий Эл (РМЭ), Чувашия (РЧ), Татарстан, Кировская и Нижегородская области (рис. 1). Тестовые участки для валидации тематического картирования лесного покрова Среднего Поволжья подбирались с таким расчётом, чтобы охватить все основные классы возраста лесов и разных типов условий местопрорастания. Они были заложены на территории Республики Марий Эл в лесхозах: Учебно-опытном ПГТУ, Пригородном, Параньгинском, Килемарском, Звениговском и Юринском. Кроме того, тестовые участки были исследованы на территории Чувашской Республики в Канашском, Пригородном и Чебоксарском лесничествах.

Техника эксперимента и методика исследований

Методика закладки тестовых участков. Экспериментальный материал по теме исследований был собран в тече-

ние семи лет (2008 – 2015). Подбор тестовых участков для оценки точности создаваемых тематических карт лесного покрова по спутниковым снимкам проводился посредством анализа и уточнения лесоустроительных материалов: изучались таксационные описания и планы лесных насаждений, а также использовались материалы спутниковой съёмки высокого разрешения (ALOS, Rapid Eye, Канопус-В, Ресурс-П). При этом главными критериями при подборе тестовых участков были следующие: их представленность во всех классах наземного покрова и равномерное распределение по территории изучаемого региона Среднего Поволжья.

Площадь тестового участка составляла не менее 3 га, что позволяет её идентификацию на спутниковых снимках Landsat среднего пространственного разрешения. Для каждого лесного тестового участка определялись состав насаждения, средняя

высота, средний диаметр и возраст преобладающей породы древостоя.

Каждый исследованный тестовый участок привязывался на местности с помощью GPS-приёмника GARMIN eTrex. В целом для валидации полученных тематических карт были использованы данные 725 тестовых участков, заложенных в основном в республиках Марий Эл и Чувашия. Помимо полевых данных, были также подобраны существующие эмпирические данные на исследуемую территорию: 1) планы лесонасаждений масштаба 1:250 000 и лесотаксационные описания лесничеств РМЭ и РЧ; 2) топографические карты масштаба 1:200 000; 3) векторный слой данных Министерства лесного хозяйства РМЭ по основным лесобразующим породам с лесотаксационной атрибутивной информацией; 4) мультиспектральные снимки высокого пространственного разрешения со спутников RapidEye, Alos, Ресурс-П и Канопус-В.

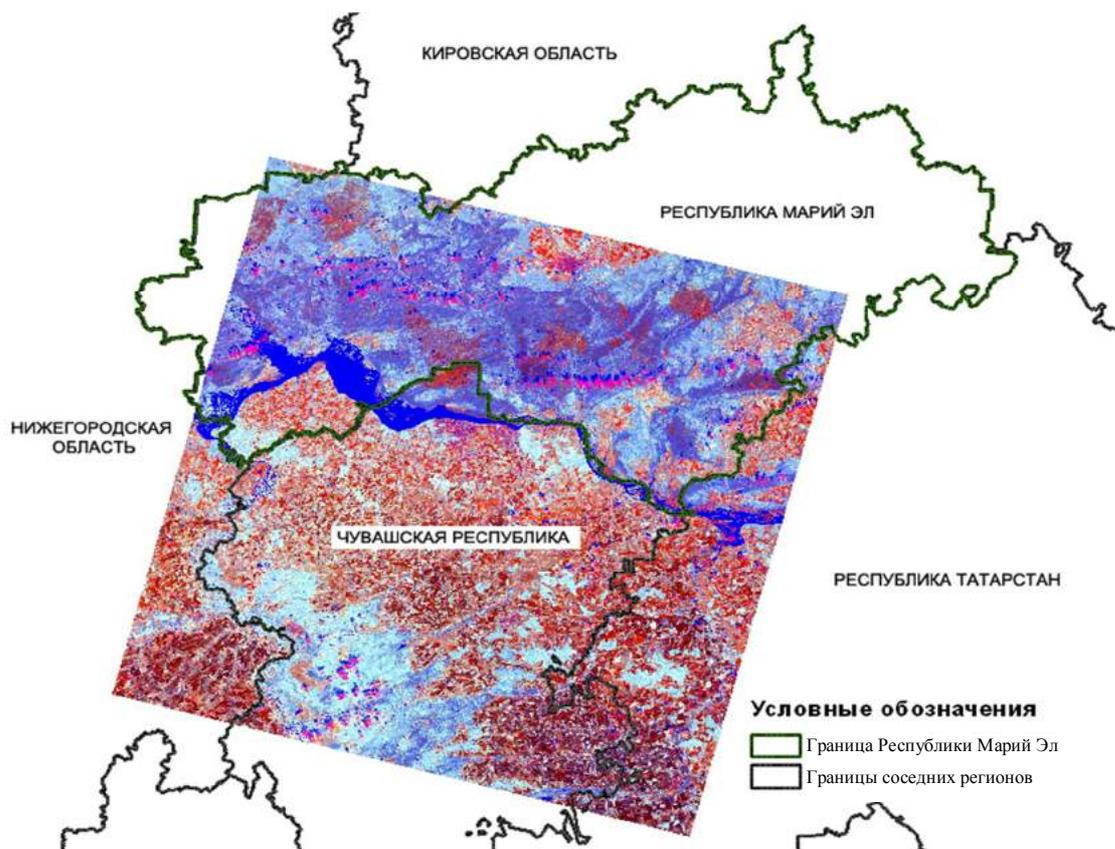


Рис. 1. Снимок Landsat с административными границами областей и республик Среднего Поволжья

Предварительная подготовка изображений. В работе были использованы две мультиспектральные сцены спутника Landsat-7 ETM+ и Landsat-8 (табл. 1), прошедшие радиометрическую и геометрическую обработку уровня 1G, с пространственным разрешением 30 м в проекции UTM (zone 42N, WGS84). Все снимки Landsat TM на территорию исследований прошли атмосферную коррекцию в программном пакете ENVI-5.3 с использованием модуля FLAASH, который позволил выравнять коэффициенты спектральной яркости поверхности для каждого спектрального канала. Для обработки снимков был выбран алгоритм «атмосферная коррекция с постоянными атмосферными условиями» и с частичным устранением эффекта теней. Используемые спутниковые сцены системы Landsat позволили охватить наземный покров всей исследуемой территории.

Для выявления трёх главных показателей (brightness – яркость, greenness – зелёность, wetness – влажность), способствующих дешифрированию растительных объектов местности на космических снимках и разделимости страт на тематической карте, в пакете ENVI-5.3 использован алгоритм Tasseled Cap («колпачок с кисточкой») [24]. Этот алгоритм представляет собой эмпирическое линейное преобразование шести каналов мультиспектральной спутниковой сцены в три отдельных изображения (яркость, зелень и влажность), обычно используемых при изучении растительного покрова [25].

Преобразование Tasseled Cap можно рассматривать как обобщённый вариант метода главных компонент, который позволяет выполнять переход из пространства измерений спектральных характеристик объектов в векторное «пространство признаков», связанных со свойствами заданного класса объектов. Пространство признаков (brightness – яркость, greenness – зелёность, wetness – влажность) при этом не содержит в себе новой информации об объектах, но позволяет наилучшим образом различать классы наземного покрова. В изображении BGW каждому типу объектов соответствует определённый цвет. Например, лиственные породы представлены более светлым тоном «зелёности», чем хвойные. Для не покрытых растительностью земель характерны значения высокой яркости, низкой зелёности и влажности. Класс «деревья» обычно характеризуется комбинацией средних показателей яркости, высоких значений зелёности и влажности. Для проведения процедуры нормализации (выравнивания) значений пикселей на полученных изображениях BGW были использованы формулы:

$$Br = (B - B_{\mu})/B_{\sigma},$$

$$Gr = (G - G_{\mu})/G_{\sigma},$$

$$Wr = (W - W_{\mu})/W_{\sigma},$$

где Br, Gr, Wr – нормализованные значения BGW; B_{μ} , G_{μ} и W_{μ} – средние значения индексов BGW; B_{σ} , G_{σ} , W_{σ} – стандартные среднеквадратические отклонения значений BGW. Далее все три нормализованных изображения Br, Gr, Wr объединялись в одно композитное Tasseled Cap (рис. 2).

Таблица 1

Характеристика снимков системы спутников

Спутник	Path	Row	Облака, %	Пространственное разрешение, м	Дата съёмки
Landsat	172	21	0	30	14.05. 2001
Landsat	172	21	10	30	22.05. 2014

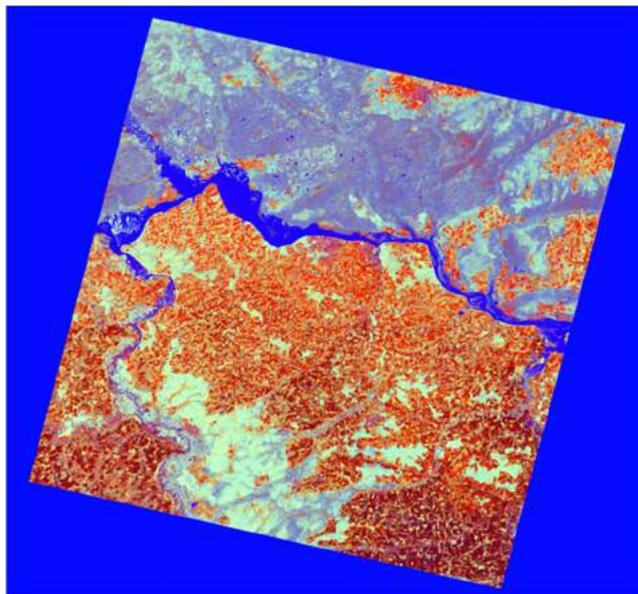


Рис. 2. Сцена спутникового снимка Landsat (синтез трёх каналов BGW) на изучаемую территорию после трансформации «Tasseled Cap»

Для исключения эффекта смешивания тематических классов наземного покрова при проведении неуправляемой классификации из полученного изображения бесшовной мозаики в графическом редакторе ENVI-5.3 исключаются площади населённых пунктов (города, посёлки и т. п.) и площади лесных гарей 2010 года с использованием искусственно созданной векторной маски. При выделении маски «лесные гари» была использована методика, основанная на оценке мультиспектральных разновременных спутниковых снимков и нормализованного индекса горимости (NBR – normalized burned ratio), нарушенных огнём [26].

Тематическая классификация спутниковых изображений. Процесс неуправляемой классификации спутниковых снимков BGW для получения тематической карты выполнялся на основе пошагового алгоритма с использованием метода IsoData (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique – итеративный самоорганизующийся способ анализа данных) с установленной градацией на 25 классов, который основан на оценке критериев близости точек в пространстве спектральных признаков. Этот алгоритм, широко

используемый в исследованиях наземного покрова, позволяет автоматически выявить «неизвестные» пиксели изображения и объединить их в несколько пространственных кластеров (классов), основанных на естественной группировке цифровых значений спектральной яркости объектов наземного покрова.

В работе для повышения точности пошаговой классификации растрового изображения BGW проводилась оценка делимости полученных тематических классов спутниковых изображений, которая включала в себя два этапа – визуальный и статистический. Визуальный метод оценки делимости классов представляет собой анализ исследуемого изображения в трёхмерном «пространстве признаков» (Spectral feature) в модуле «n-D Visualizer» программного пакета ENVI-5.3.

Основой для разделения классов в диаграмме «пространство признаков» служит различие спектральных характеристик объектов наземного покрова подстилающей поверхности на местности. При визуальном анализе делимости различных классов наземного покрова используется оценка границ перекрытий эллипсов «концентрации данных», получен-

ных на основе средних собственных спектральных значений DN (digital numbers) оцениваемых классов и их стандартных отклонений. Это безразмерное значение и стандартное отклонение каждой сигнатуры используется для представления контуров границ эллипса «концентрации облака рассеивания спектральных данных DN». Пространство спектральных признаков DN формируется на основе изображений BGW в трёхмерном графическом пространстве от 0 до 255 единиц. По оси абсцисс (X) выделяются спектральные значения пикселей DN изображения Brightness, по оси ординат (Y) – Greenness и по оси Z, соответственно, Wetness.

При разделении спектральных значений классов наземного покрова, приближающихся к нормальному распределению, форма «концентрации их данных» должна приближаться к форме эллипса. Объекты, имеющие значительные различия в спектральных показателях, например, основные пять классов наземного покрова (вода, кустарник, деревья, трава и не покрытые растительностью), имеют также максимальное удаление центров своих сигнатур в 3-d пространстве спектральных значений на диаграмме рассеивания.

Закономерность статистической разделимости классов наземного покрова в многомерном пространстве спектральных признаков определялась при помощи регрессионно-корреляционного анализа спектральных данных DN исследуемых спутниковых изображений. Чем больше статистическая разделимость спектральных сигнатур классов, тем меньше вероятность ошибки их смешения. Для этого в программном пакете ENVI-5.3 была использована утилита Statistics (Статистика), которая рассчитывает статистические взаимосвязи между сигнатурами исследуемых классов. В конечном итоге оценка разделимости классов заключается в сравнении эллипсов различных сигнатур для одной пары диапазонов спектральных значений и их статистик. В векторном

«пространстве признаков» выделяются сигнатуры, имеющие сходные группы пикселей, и оцениваются участки перекрытия смежных эллипсов. Дополнительно к такому выделению сигнатур проводится оценка средних спектральных значений условных центров исследуемых классов и их стандартных отклонений.

Пересечение эллипсов в «пространстве признаков» свидетельствует о том, что сигнатуры имеют схожие пиксели в своей совокупности DN. Для устранения такого наложения групп пикселей предложено проводить дополнительную классификацию спутникового снимка с последующей повторной оценкой сигнатур, либо схожие классы объединяются в один общий. В конечном итоге выбираются сигнатуры только в той комбинации спектральных признаков, при которой были достигнуты наилучшие средние и минимальные значения разделимости.

Тематическая классификация спутникового снимка Landsat была осуществлена в следующем порядке. После проведения первого этапа классификации на 25 классов были получены изображения трёх основных классов – «лесные» и «нелесные» земли, а также водные объекты. В программном графическом редакторе ENVI-5.3 был выделен растровый слой класса W (вода). Дальнейшая процедура классификации была проведена без этого класса [27]. После изъятия сформированных масок последующая классификация проводится с оставшимися растровыми слоями.

Следующим шагом исследования было проведение вторичной классификации спутникового снимка с установленной градацией в 25 классов для растрового слоя «лесные земли» с целью выделения в нём трёх классов – хвойные, лиственные и смешанные насаждения. После вторичной классификации мелкие классы, которые имели близкие спектральные характеристики, объединялись в один класс (хвойные, лиственные и смешанные) с использованием утилиты Merge (инструмент группировки) программы ENVI-5.3. Основани-

ем для группировки исследуемых классов наземного покрова были близкие по значению средние коэффициенты спектральной яркости, минимальные показатели среднеквадратического отклонения значений класса и коэффициента изменчивости.

С целью выделения групп возраста (молодняки, средневозрастные и приспевающие, спелые и перестойные насаждения) дешифрируемого класса лесного покрова каждый из полученных тематических слоёв подвергался детальной классификации с заданным количеством градаций и итераций. Для каждого объекта исследований в программе ENVI-5.3 использовался модуль Statistics, позволяющий провести оценку разделимости классов, обладающих различными спектральными характеристиками, и программный пакет Excel. При этом смешанные насаждения были разбиты только на две группы возраста: средневозрастные и приспевающие, спелые и перестойные. Молодняки на исследуемой территории представлены в основном чистыми лиственными или хвойными насаждениями [28].

Аналогичным образом проводилась классификация ранее полученного слоя «нелесные земли», к которым относятся земли сельхозугодий (обрабатываемые и заброшенные), заболоченные участки и площади не покрытые растительностью.

Для повышения точности классификации слоя «обрабатываемые земли» он был разделён путём переклассификации на два класса – травянистый сомкнутый (НС) и обрабатываемые земли (НС_С) – также с использованием утилиты Signature Edit.

После выделения всех классов методом неуправляемой классификации была получена детальная тематическая карта на 14 классов наземного покрова. Цвет каждого слоя растительного покрова тематической карты принимался в соответствии с единой шкалой окраски карт-схем лесных страт, что также позволило приблизить получаемые данные к российским стандартам лесной инвентаризации [29]. Следующим шагом явилось создание обобщённой тематической карты пяти основных классов, которые были получены на основе объединения 14 более детальных классов наземного покрова (рис. 3).

Генерализация растровой тематической карты. Инструменты генерализации пространственных данных в ENVI-5.3 используются для очистки небольших фрагментов ошибочных пикселей и с целью удаления или сглаживания ненужных деталей полученных растровых классов тематической карты. При этом процесс генерализации тематических карт позволяет сохранить первоначальный объём информации спутникового изображения [30].

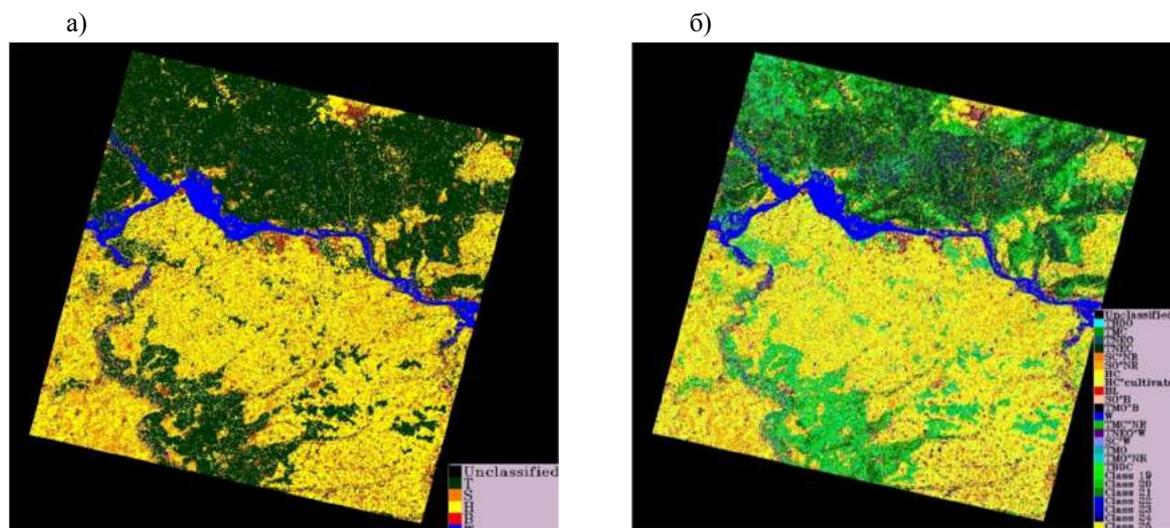


Рис. 3. Тематические карты, полученные на основе спутникового снимка Landsat ETM+ 2001 г.: а) обобщённая карта на пять классов наземного покрова, б) детальная карта на 25 классов

Тематическая генерализация проводится с сохранением целостности данных с учётом принятой минимальной площади полигона класса наземного покрова (3 га) и соблюдения правил иерархической системы LCCS. Генерализация проводится для отдельных пикселей или комбинации групп пикселей (кластеры) внутри ранее сформированных классов. Для этого используются методы агрегирования, сглаживания границ полигонов, растягивания, фильтрации или уменьшения объёма растровых данных в программных пакетах ENVI-5.3 и ArcGIS-10. В зависимости от поставленных целей и задач процесс генерализации может проводиться на нескольких уровнях: макро (класс/карта), мезо (группа объектов) и микро (одиночные объекты). В работе были использованы мезо- и микроуровни, классы на макроуровне были получены ранее в процессе классификации.

Результаты исследований. Максимальное сближение (наложение) значений в облаке пространства спектральных признаков наблюдается при выделении (классификации) лесов по молодым и средневозрастным группам возраста – «молодняки» (TNBC_Y), «хвойный сомкнутый средневозрастный» (TNEC_M) и «древесно-кустарниковые» (T_S) классы насаждений (рис. 4). Кроме того, можно заметить небольшое наложение классов BL и HC, что также свидетельствует о схожести их спектральных характеристик.

Максимальную спектральную разделимость показали практически все доминирующие классы наземного покрова: лес, трава, кустарники, водные объекты и не покрытые растительностью земли. Кроме того, приемлемую спектральную разделимость на тематической карте Landsat 2014 показало большинство классов лесного покрова исследуемой территории. Средние значения DN кривых страт «хвойные, лиственные и смешанные спелые и перестойные» не пересекаются на диаграмме рассеивания и обладают умеренным диа-

пазоном дисперсии (рис. 5). Подобную картину можно наблюдать для средневозрастных насаждений этих же классов (страт) лесного покрова. Графики спектральных значений молодых насаждений на снимке Landsat 2014 после проведённой пошаговой классификации значительно отличаются от средневозрастных классов. Это позволяет выделять их между собой без дополнительных работ по анализу тематической карты. С другой стороны, наблюдается перемешивание этих классов со стратами «травянистый» и «древесно-кустарниковый» покровы. Особенно это заметно на примере трансформированного канала Br. Соответственно в этом случае приходится использовать дополнительные алгоритмы по переклассификации снимков Landsat и применять методы экспертно-аналитического дешифрирования на более детальном уровне.

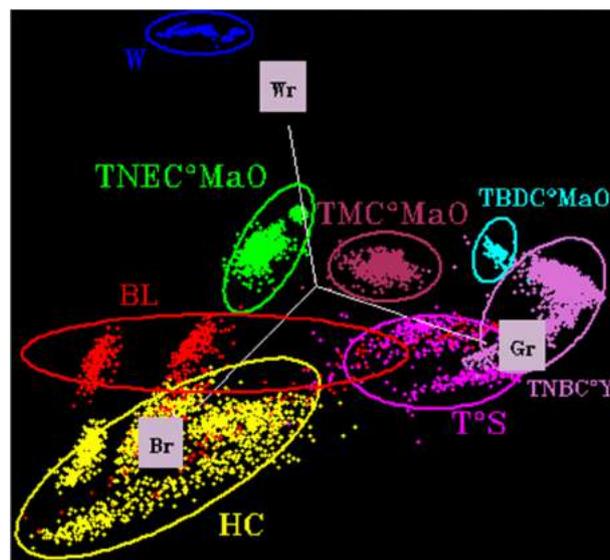


Рис. 4. Диаграмма рассеивания для спектральных значений DN восьми классов легенды наземного покрова

Полученные зависимости выделенных классов наземного покрова от значений BGW являются важными данными для последующей работы по автоматизации процесса классификации и оценки точности тематического картирования. Как

видно из табл. 2, на исследуемой территории самым большим по площади явился класс «травянистый сомкнутый» (НС_С), составляющий по площади на тематической карте Landsat 2001 года 25,1 % от общей территории Марий Эл и Чувашии. Одновременно с классом НС общая площадь обрабатываемых земель составляла в 2001 году 40 %, а в 2014 – порядка 39 % от всей территории тематической карты спутникового снимка.

Изменения в площади классов НС (травянистый покров) и НС_С (обрабатываемые земли) объясняются сезонной динамикой растительного покрова сельско-

хозяйственных угодий. В целом суммарно площади этих двух классов за текущий период времени существенно не изменились. Уменьшение доли обрабатываемых сельскохозяйственных земель (НС_С) и увеличение травянистого покрова (НС) практически на эту же величину, в первую очередь, связаны со снижением сельскохозяйственной деятельности в исследуемом регионе в начале 2000-х. Одновременно повсеместно на этой территории наблюдается постепенное зарастание брошенных земель многолетними травами и древесно-кустарниковой растительностью.

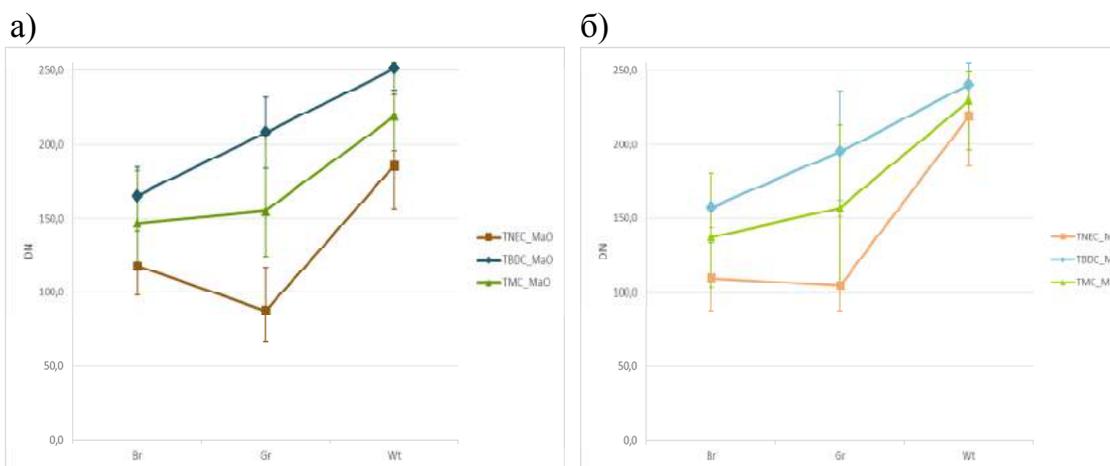


Рис. 5. Графики средних значений спектральных показателей DN по каналам BGW: а) для хвойных, лиственных и смешанных спелых и перестойных; б) хвойных, лиственных и смешанных средневозрастных

Таблица 2

Распределение классов наземного покрова на тематической карте Landsat 2001 и 2014 гг.

Классы	Landsat 2001, га	Процент от общей площади	Landsat 2014, га	Процент от общей площади
TNEC_MaO	232583,7	7,1	141509,4	4,3
TNEC_M	211083,9	6,4	286802,8	8,7
TNEO_W	15595,5	0,5	37162,71	1,1
TBDC_MaO	347036,5	10,5	69217,74	2,1
TBDC_M	364979,8	11,1	276926,4	8,4
TMC_MaO	78936,8	2,4	101494,6	3,1
TMC_M	141903,2	4,3	202976,0	6,2
TNBC_Y	197124,3	6,0	396930,5	12,0
T_S	141902,3	4,3	241968,2	7,3
НС	481826,5	14,6	637849,8	19,4
НС_С	827274,3	25,1	647195,3	19,6
TMO_B	116488,3	3,5	119197,0	3,6
BL	2325,2	0,1	16122,24	0,5
W	135506,0	4,1	119385,8	3,6
Итого	3294566,0	100	3294739,0	100

Среди тематических слоёв (страт) лесного покрова наибольшую площадь занимает класс «мелколиственные средневозрастные среднепроизводительные насаждения» (TBDC_M), который на снимке Landsat в 2014 году достиг 11,1 % от общей территории исследований. В связи с переходом части подобных насаждений в другие тематические классы лесного покрова (в частности, в связи с возрастом), в 2014 году площадь класса TBDC_M на тематической карте Landsat уменьшилась до 8,4 %. В 2001 году значительным по площади (10,5 %) также был класс TBDC_MaO (мелколиственные спелые и перестойные среднепроизводительные), площадь которого на тематической карте Landsat 2014 года уменьшилась до 2,1 % от общей площади территории исследований.

В работе также были получены тематические карты Landsat 2001 и 2014 гг. с распределением на пять основных (доминирующих) классов наземного покрова (рис. 6). Для карт грубого разрешения использовалась единая шкала на пять классов наземного покрова.

	Деревья	T
	Кустарник	S
	Трава	H
	Вода	W
	Не покрытые растительностью земли	B

Полученные данные на пять классов в целом дополняют общую картину распределения классов на тематических картах с 14 стратами наземного покрова.

Исторически в районе Среднего Поволжья площади лесных массивов подвергались серьёзным нарушениям только в связи с катастрофическими природными явлениями (пожары, болезни) или внешними антропогенными воздействиями (сплошная вырубка) [31]. В целом тематический класс «лес» на изучаемой территории с 2001 по 2014 гг. снизился по площади на 2,7 % (212940,3 га). По нашему мнению, наряду с традиционной вырубкой, такое существенное снижение площади лесных насаждений может быть также связано с их большими потерями во время катастрофических лесных пожаров 2010 года, когда на территории республик Марий Эл и Чувашии сгорело более 114 тыс. га леса [20].

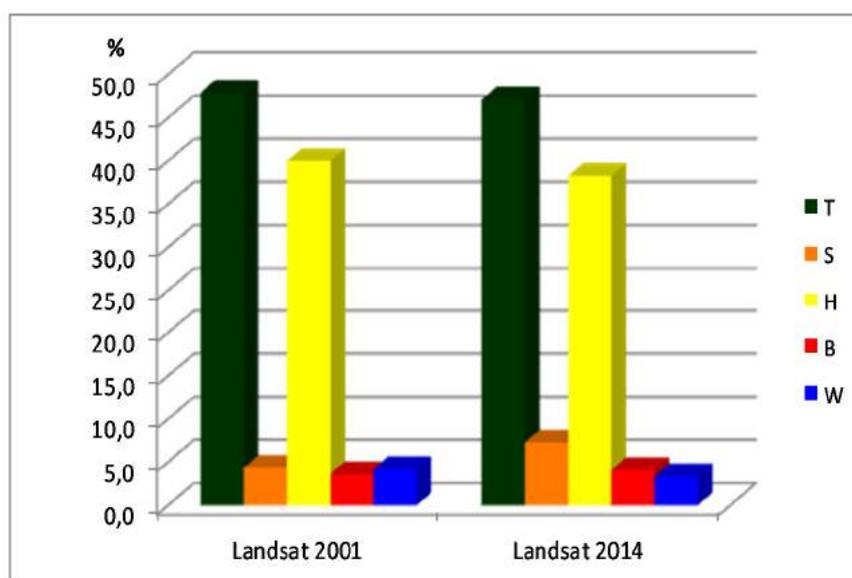


Рис. 6. Динамика классов наземного покрова тематических карт Landsat 2001 и 2014 гг.

Выводы

1. Предложена усовершенствованная методика пошаговой классификации лесного покрова по спутниковым снимкам среднего разрешения на основе подходов международных организаций ФАО, НАСА и российской ГИЛ.

2. В работе получены зависимости распределения классов (страт) лесного покрова от спектральных сигнатур снимков спутника Landsat в пространстве признаков Bg (яркость), Gr (зеленость) и Wt (влажность), трансформированных по методу Tasseled Cap («колпачок с кисточкой»). Максимальную разделимость показали основные лесные классы TNEC_MaO (хвойные сомкнутые спелые и перестойные), TBDC_MaO (лиственные сомкнутые спелые и перестойные) и TMC_MaO (смешанные спелые перестойные).

3. Близкие значения спектральных сигнатур показали спелые и средневозрастные насаждения, что приводит к смешиванию классов в процессе классификации спутниковых снимков. С другой стороны, молодняки показывают высокую спектральную разделимость от класса «средневозрастные насаждения», что также позволяет повысить качество тематического картирования лесного покрова.

4. Полученные тематические карты Landsat 2001 и 2014 для 14 классов наземного покрова на исследуемую территорию Среднего Поволжья показывают снижение площади класса TNEC_MaO (светлохвойные спелые и перестойные среднепроизводительные) на 2,8 %. Одновременно по картам наблюдается увеличение классов TNEC_M (светлохвойные средневозрастные среднепроизводительные) на 2,3 %, TNEO_W (мелколиственные спелые и перестойные среднепроизводительные) на 0,6 %.

5. В целом за период 2001–2014 гг. по пяти основным классам наземного покрова тематических карт Landsat наблюдается снижение площади класса «лес» на 2,7 %, увеличение класса «кустарниково-древесной растительности» и класса «не покрытого растительностью» – на 0,6 %.

6. Результаты работы могут быть использованы при осуществлении лесного мониторинга методами дистанционного зондирования, реализации лесохозяйственных мероприятий по повышению продуктивности, сохранению (приумножению) биоразнообразия и комплексному использованию лесных ресурсов, созданию баз данных по запасам углерода в лесах России.

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. Колесникова, О.Н. Возможности ПК ENVI для обработки мультиспектральных и гиперспектральных данных / О.Н. Колесникова, А.С. Черепанов // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 24-27.

2. Ran, Y. Evaluation of four remote sensing based land cover products over China / Y. Ran, X. Li, L. Lu // International Journal of Remote Sensing. – 2010. – Vol. 31, № 2. – Pp. 391-401.

3. Савин, И.Ю. Спутниковый мониторинг воздействия засухи на растительность (на примере засухи 2010 года в России) / И.Ю. Савин, С.А. Барталев, Е.А. Лупян и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – С. 150-162.

4. 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.

5. Хлюстов, В.К. Автоматизация комплексной оценки лесных ресурсов и мониторинг состояния лесов дистанционными методами нового поколения / В.К. Хлюстов // Лесное хозяйство. – 2011. – № 6. – С.13-14.

6. Курбанов, Э.А. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat / Э.А. Курба-

нов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 1(21). – С. 18-32.

7. *Levin, N.* Mapping forest patches and scattered trees from SPOT images and testing their ecological importance for woodland birds in a fragmented agricultural landscape / N. Levin, C. McAlpine, S. Phinn, et al. // *International Journal of Remote Sensing.* – 2009. – Vol. 30, № 12. – Pp. 3147–3169.

8. *Терехин, Э.А.* Анализ каналов спутниковых данных Landsat TM для оценки характеристик лесных насаждений лесостепной провинции средне-русской возвышенности / Э.А. Терехин // *Исследование Земли из космоса.* – 2012. – № 2. – С. 53-62.

9. *Bartalev, S.A.* New SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia/ S.A. Bartalev, A.S. Belward, D. Ershov, A.S. Isaev // *International Journal of Remote Sensing.* – 2003. – Vol. 24. – Pp. 1977-1982.

10. *Барталев, С.А.* Исследования ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова / С.А. Барталев, Е.А. Лупян // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 197-214.

11. *Елсаков, В.В.* Картирование растительного покрова бассейна р. Кожим (Приполярный Урал) с использованием материалов дистанционного зондирования / В.В. Елсаков, И.О. Марущак, В.М. Щанов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2009. – Т. 2., Вып. 6. – С. 360-364.

12. *Елсаков, В.В.* Растительный покров Югорского полуострова в условиях климатических изменений последних десятилетий / В.В. Елсаков, Е.Е. Кулюгина // *Исследование Земли из космоса.* – 2014. – Т. 11, № 3. – С. 65-77.

13. *Харин, Н.Г.* Возможности использования вегетационного индекса (NDVI) для изучения фенологии и состава лесов России / Н.Г. Харин, В.М. Жирин, Р. Татеиши // *Исследование Земли из космоса.* – 2006. – № 3. – С. 89-96.

14. *Воробьев, О.Н.* Дистанционный мониторинг городских лесов / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета.* Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 1 (25). – С. 5-21.

15. *Potapov, P.* Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss / P. Potapov, M.C. Hansen, S.V. Stehman et al // *Remote Sensing of Environment.* – 2008. – № 112(9). – Pp. 3708-3719.

16. *Sohl, T.L.* Addressing foundational elements of regional land-use change forecasting/ T.L. Sohl, R.L. Thomas, M.S. Benjamin, et al // *Landscape ecology.* – 2010. – № 25. – Pp. 233-247.

17. *Cohen, W.B.* An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data / W.B. Cohen, T.K. Maier-sperger, S.T. Gower, D.P. Turner // *Remote Sensing of Environment.* – 2003. – № 84. – Pp. 561-571.

18. *Phillips, R.L.* Scaling-up knowledge of growing-season net ecosystem exchange for long-term assessment of North Dakota grasslands under the Conservation Reserve Program/ R.L. Phillips, O. Beeri // *Global Change Biology.* – 2008. – № 14. – Pp. 1008-1017.

19. *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.

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. *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.

22. *Денисов, С.А.* Проблемы воспроизводства сосновых лесов Среднего Поволжья/ С.А. Денисов, К.К. Калинин, В.П. Бессчетнов и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета.* Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2012. – № 1 (15). – С. 12-23.

23. *Курбанов, Э.А.* Опыт сохранения уникальных лесов и биологического разнообразия в национальных парках западного побережья США / Э.А. Курбанов, М.А. Яцков, О.Н. Воробьев и др. // *Вестник Марийского государственного технического университета.* Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2011. – № 1 (11). – С. 99-107.

24. *Курбанов, Э.А.* Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заволжье / Э.А. Курбанов, Т.В. Нуреева, О.Н. Воробьев и др. // *Вестник Марийского государственного технического университета.* Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2011. – № 3 (13). – С. 17-24.

25. *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.

26. *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.

27. *Губаев, А.В.* Классификация наземного покрова Среднего Поволжья по спутниковым снимкам среднего разрешения / А. В. Губаев, Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев и др. // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международного научно-практического семинара [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – С. 7-19. – URL: <http://csfm.marstu.net/publications.html> 20.04.2012

28. *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.

29. Методические рекомендации по проведению государственной инвентаризации лесов: утверждены приказом Рослесхоза от 10.11.2011 № 472 // [Электронный ресурс]. – 2011. Режим доступа: <http://www.rosleshoz.gov.ru/docs/leshoz/199> (Дата обращения 05.12.2015).

30. *Курбанов, Э.А.* Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин и др. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. – 132 с.

31. *Денисов С.А.* Управление лесовосстановлением на горях / С.А. Денисов, Т.А. Конохова, Т.С. Рачкова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 3 (27). – С. 5-14.

Статья поступила в редакцию 09.09.15.

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 60 научных и учебно-методических работ.

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 и ГИС, биологическая продуктивность лесных экосистем, депонирование углерода лесными экосистемами, леса Киото. Автор 140 научных и учебно-методических работ.

ГУБАЕВ Александр Владимирович – младший научный сотрудник, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование и ГИС, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 20 публикаций.

ДЕМИШЕВА Екатерина Николаевна – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС, оценка загрязнённых территорий. Автор пяти публикаций.

UDC 630*583

METHOD OF STEPWISE CLASSIFICATION OF SATELLITE IMAGES FOR THE THEMATIC MAPPING OF FOREST COVER**O. N. Vorobyev, E. A. Kurbanov, A. V. Gubayev, E. N. Demisheva**

Volga State University of Technology

3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

E-mail: Vorobievon@volgatech.net; Kurbanovea@volgatech.net

Key words: *satellite images; GIS; remote sensing; classification; remote monitoring of forests; thematic mapping.***ABSTRACT**

Introduction. Question of unification and automation of the forest cover decoding are of great importance in connection to increasing number of used satellites. Regional estimates of forest cover are significant for solving problems of monitoring and validation of thematic maps by alignment of satellite images of middle and high spatial resolutions. **The goal of research** is to develop method of stepwise classification of satellite images of middle resolution for thematic mapping of forest cover with the use of classification systems of FAO, NASA and Russian state forest inventory. **Objects and methods.** Application of the methodology was carried out on the territory of Middle Povolzhje including Republics of Mari El, Chuvashia, Tatarstan, Kirov and Nizhny Novgorod region. In the research we used archival Landsat images of 2011 and 2014 years. Spectral separability of forest classes on the satellite images, transformed by the "Tasseled cap" procedure to the images of Brightness, Greenness, and Wetness, was carried out in the "feature space". For determination of the age groups (young, middle-aged, mature and over mature stands) of the decoding forest class each thematic layer was subject to detailed classification with scale of specified gradations and iterations. **Results and discussion.** After separation of all classes under unsupervised classification a detailed thematic map on 14 and 5 classes of land cover was derived. Similar values of spectral signatures showed mature and middle aged forest stands, which brings to the mixture of classes in the process of satellite images classification. Maximum spectral separability revealed main forest classes TNEC_MaO (Tree Needleleaved Evergreen Closed_Mature and Overmature), TBDC_MaO (Tree Broadleaved Deciduous Closed_Mature and Overmature), and TMC_MaO (Tree mixed closed_Mature and Overmature). The analyses of newly obtained multi temporal thematic maps on the territory of Middle Povolzhje show a decrease of TNEC_MaO class area on the 2,8%. At the same time on the base of thematic maps of 2001 and 2014 there is a slight increase in TNEC_M class (Tree Needleleaved Evergreen Closed_Middle aged) on 2,3%, and TNEO_W (Tree Needleleaved Evergreen Closed_Wetland) on 0,6%. The research results could be used for the implementation of forest monitoring with the use of remote sensing techniques. **Conclusions.** We suggest improved methodology of stepwise classification of forest cover on satellite images of middle spatial resolution on the base of international systems of land cover classifications. The research results could be used during implementation of forest monitoring by the methods of remote sensing, carrying out forest activities on increasing productivity, conservation of biodiversity and sustainable use of forest resources.

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

REFERENCES

1. Kolesnikova O.N., Cherepanov A.S. Vozmozhnosti PK ENVI dlya obrabotki multispektralnykh i giperspektralnykh dannykh [ENVI Capabilities to Process Multispectral and Hyperspectral Data]. *Geomatika* [Geomatics]. 2009. № 3. Pp. 24-27.
2. Ran Y., Li X., Lu L. Evaluation of Four Remote Sensing Based Land Cover Products over China International Journal of Remote Sensing. 2010. Vol. 31, № 2. Pp. 391-401.
3. Savin I.Yu., Bartalev S.A., Lupyan E.A., et al. Sputnikovyy monitoring vozdeystviya zasukhi na rastitelnost (na primere zasukhi 2010 goda v Rossii) [Satellite Monitoring of Drought Influence on Vegetation (based on the Drought-2010 in Russia)]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Present-Day Problems of Earth Remote Sensing from the Space]. 2011. Vol. 8. Pp. 150-162.
4. Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Gubaev A.V., et al. Otsenka zarastaniya zemel zapasa Respubliki Mariy El lesnoy rastitelnostu po sputnikovym snimkam [Assessment of Mari El Reserve Lands Colonization with Forest Vegetation by Satellite Images]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie* [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2010. № 2(9). Pp. 14-20.
5. Khlustov V.K. Avtomatizatsiya kompleksnoy otsenki lesnykh resursov i monitoring sostoyaniya lesov distantsionnymi metodami novogo pokoleniya [Automation of Complex Assessment of Forest Re-

sources and Monitoring of Forests Condition Using Remote Methods of New Generation]. *Lesnoe khozaystvo* [Forestry]. 2011. № 6. Pp.13-14.

6. Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Gubaev A.V., et al. Chetyre desyatiletia issledovaniy lesov po snimkam Landsat [Four Decades of 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. Levin N., McAlpine C., Phinn S., et al. Mapping Forest Patches and Scattered Trees from SPOT Images and Testing Their Ecological Importance for Woodland Birds in a Fragmented Agricultural Landscape. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30. № 12. Pp. 3147–3169.

8. Terekhin E.A. Analiz kanalov sputnikovyykh dannyykh Landsat TM dlya otsenki kharakteristik lesnykh nazashdeniy lesostepnoy provintsii srednerusskoy vozvysheynosti [Analysis of the Channels of Satellite Data Landsat TM to Assess the Peculiarities of Forest Plantations in Forest-Steppe Region of Central Russian Upland.]. *Issledovanie zemli iz kosmosa* [Earth Study from the Space]. 2012. № 2. Pp. 53-62.

9. Bartalev S.A., Belward A.S., Ershov D., Isaev A.S. New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia. *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24. Pp. 1977-1982.

10. Bartalev S.A., Lupyan E.A. Issledovaniya IKI RAN po razvitiu metodov sputnikovogo monitoring rastitelnogo pokrova [Study of the Institute for Space Research to Develop the Methods of Satellite Monitoring of Vegetation]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Present-Day Problems of Earth Remote Sensing from the Space]. 2013. Vol. 10, № 1. Pp. 197-214.

11. Elsakov V.V., Marushak I.O., Shchanov V.M. Kartirovaniye rastitelnogo pokrova basseyna r. Kozhim (Pripolyarnyy Ural) s ispolzovaniem materialov distantsionnogo zondirovaniya [Mapping of Vegetation Cover of the Kozhim basin (Nether-Polar Urals) Using the Data of Remote Sensing]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Present-Day Problems of Earth Remote Sensing from the Space]. 2009. Iss. 6, Vol. 2. Pp. 360-364.

12. Elsakov V.V., Kulyugina E.E. Rastitelnyy pokrov Yugorskogo poluostrova v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy poslednikh desyatiletii [Vegetation Cover of the Yugo Peninsula in Conditions of Climatic Changes of the Past Decades]. *Issledovanie zemli iz kosmosa* [Earth Study from the Space]. 2014. Vol. 11, № 3. Pp. 65-77.

13. Kharin N.G., Zhirin V.M., Tateishi R. Vozmozhnosti ispolzovaniya vegetatsionnogo indeksa (NDVI) dlya izucheniya fenologii i sostava lesov Rossii [Possibilities to Use the Vegetation Index (NDVI) Studying the Phenology and Russian Forests Composition]. *Issledovanie zemli iz kosmosa* [Earth Study from the Space]. 2006. № 3. Pp. 89-96.

14. Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V.,

et al. Distantsionnyy monitoring gorodskikh lesov [Remote Sensing of Urban Forests]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie*. [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2015. № 1(25). Pp. 5-21.

15. Potapov P., Hansen M.C., Stehman S.V., et al. Combining MODIS and Landsat Imagery to Estimate and Map Boreal Forest Cover Loss. *Remote Sensing of Environment*. 2008. № 112(9). Pp. 3708-3719.

16. Sohl T.L., Thomas R.L., Benjamin M.S., et al. Addressing Foundational Elements of Regional Land-Use Change Forecasting. *Landscape Ecology*. 2010. № 25. Pp. 233-247

17. Cohen W.B., Maersperger T.K., Gower S.T., Turner D.P. An Improved Strategy for Regression of Biophysical Variables and Landsat ETM+ Data. *Remote Sensing of Environment*. 2003. № 84. Pp. 561-571.

18. Phillips R.L., Beerli O. Scaling-up Knowledge of Growing-Season Net Ecosystem Exchange for Long-Term Assessment of North Dakota Grasslands under the Conservation Reserve Program. *Global Change Biology*. 2008. № 14. Pp. 1008-1017.

19. Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Gubaev A.V., et al. Otsenka zarastaniya zemel zapasa Respubliki Mariy Eel lesnoy rastitelnostu po sputnikovym snimkam [Assessment of Mari El Reserve Lands Colonization with Forest Vegetation by Satellite Images]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie* [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2010. № 2(9). Pp. 14-20.

20. Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Lezhnin S.A. Metodika vyyavleniya stepeni povrezhdeniya drevostoev posle pozharov 2010 goda v Srednem Povolzhe [Methods to Reveal the Damage Level of Stands after Fires - 2010 in the Middle Volga Region]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Present-Day Problems of Earth Remote Sensing from the Space]. 2014. № 4 (11). Pp. 217-229.

21. Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Nezamaev S.A., et al. Tematicheskoe kartirovaniye i stratifikatsiya lesov Mariyskogo Zavolzhya po sputnikovym snimkam Landsat [Thematic Mapping and Stratification of Mari Trans-Volga Region Forests by Landsat Satellite Images]. *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.

22. Denisov S.A., Kalinin K.K., Besschetnov V.P., et al. Problemy vosproizvodstva sosnovyykh lesov Srednego Povolzhya [Problems of Pine Forests Reproduction in the Middle 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. 12-23.

23. Kurbanov E.A., Yatskov M.A., Vorobyev O.N., et al. Opyt sokhraneniya unikalnykh lesov i

biologicheskogo raznoobraziya v natsionalnykh parkakh zapadnogo poberezhya SShA [An Experience of Conservation of Unique Forests and Biodiversity in the National Parks of Western USA]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie*. [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2011. № 1 (11). Pp. 99-107.

24. Kurbanov E.A., Nureeva T.V., Vorobyev O.N., et al. Distsionnyy monitoring dinamiki narusheniya lesnogo pokrova, lesovozobnovleniya i lesovosstanovleniya v Mariyskom Zavolzhe [Remote Sensing of Dynamics of Forest Cover Disturbance, Forest Regeneration and Forest Restoration in Mari Trans-Volga Region]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie*. [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2011. № 3 (13). Pp. 17-24.

25. 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.

26. Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V., et al. Distsionnyy monitoring lesnykh garey v Mariyskom Zavolzhe [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.

27. Gubaev A.V., Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., et al. Klassifikatsiya nazemnogo pokrova Srednego Povolzhya po sputnikovym snimkam srednego razresheniya [Classification of Middle Volga Land Cover by Satellite Images of Medium Resolution]. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya*

klimate: biologicheskaya produktivnost i distantsionnyy monitoring: materialy mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminara [Forest Ecosystems in Conditions of Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring: proceedings of International research and practical seminar]. Yoshkar-Ola: MapГТУ, 2011. Pp. 7-19. URL: <http://csfm.marstu.net/publications.html> (Reference date: 20.04.2012).

28. Vorobyev O.N., Kurbanov E.A. Monitoring sostoyaniya rastitelnogo pokrova na territorii Respubliki Mariy El s ispolzovaniem ENVISAT MERIS [Monitoring of Vegetation Cover Condition in Mari El Republic with Usage of ENVISAT MERIS]. *Vestnik MGUL-Lesnoy Vestnik* [Vestnik of Moscow State Forest University – Forest Vestnik]. 2013. № 7(99). Pp. 42-45.

29. Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu gosudarstvennoy inventarizatsii lesov: utverzhdenyy prikazom Rosleshoza ot 10.11.2011 № 472 [Methodological Recommendations for National Forest Inventory: approved by the order of Federal Forestry Agency of 10.11.2011 № 472]. URL: <http://www.rosleshoz.gov.ru/docs/leshoz/199> (Reference date: 05.12.2015).

30. Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Lezhnin S.A., et al. *Tematicheskoe kartirovanie rastitelnogo pokrova po sputnikovym snimkam: validatsiya i otsenka tochnosti* [Thematic Mapping of Vegetation Cover by Satellite Images: Validation and Accuracy Evaluation]. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2015. 132 p.

31. Denisov S.A., Konukhova T.A., Rachkova T.S. Upravlenie lesovosstanovleniem na garyakh [Forest Restoration Management at the Fire-Sites]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie*. [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.]. 2015. № 3 (27). Pp. 5-14.

The article was received 09.09.15.

Citation for an article: Vorobyev O. N., Kurbanov E. A., Gubayev A. V., Demisheva E. N. Method of stepwise classification of satellite images for the thematic mapping of forest cover. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2015. No 4 (28). Pp. 57-72.

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 more than 50 scientific publications and textbooks.

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 140 scientific publications and textbooks.

GUBAYEV Aleksandr Vladimirovich – senior researcher 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 more than 20 research publications.

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.