

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ. БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 630*583

*Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, С. А. Незамаев,
А. В. Губаев, С. А. Лежнин, Ю. А. Полевщикова*

ТЕМАТИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ И СТРАТИФИКАЦИЯ ЛЕСОВ МАРИЙСКОГО ЗАВОЛЖЬЯ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ LANDSAT

Разработана методика тематического картирования лесного покрова по спутниковым снимкам Landsat с выделением классов (лесных страт) по составу, возрасту и относительной полноте насаждений. Тематическое картирование основано на комплексном подходе с использованием трансформации спутниковых изображений методом Tasseled cap и более совершенным выделением исследуемых классов наземного покрова управляемой классификацией по методу опорных векторов. Проведена апробация и оценка разработанной методики для территории Марийского лесного Заволжья на основе снимков среднего разрешения Landsat 2001 г. Оценка точности тематического картирования на основании тестовых участков и материалов лесоустройства показала высокую степень их достоверности.

Ключевые слова: *тематическое картирование; лесные насаждения; дистанционное зондирование земли; спутниковые снимки Landsat; ГИС; мониторинг лесов.*

Введение. Совершенствование методов оценки площадей и запасов древостоев является важной научно-практической задачей для Российской Федерации, обладающей большими площадями бореальных лесов. Точность и оперативность в определении фитомассы (депонированного углерода) также является неотъемлемым требованием при выполнении международных обязательств Россией по конвенции об изменении климата. В этой связи при оценке древостоев на региональ-

ном и континентальном уровне возрастает значение современных методов дистанционного зондирования.

Исследованиям спутниковых снимков при оценке площадей (запасов) и тематическом картировании растительного покрова посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей. Изображения с системы спутников Landsat наиболее широко используются учеными, занимающимися тематическим картированием и мониторингом

за растительным покровом. Это объясняется наличием большой архивной базы их снимков, мультиспектральных каналов в видимой и инфракрасной зоне электромагнитного спектра, приемлемым уровнем пространственного разрешения, широким охватом исследуемой территории.

Американские ученые W.B. Cohen и T.A. Spies [1], проводившие сравнение пространственных и спектральных характеристик Landsat TM (Thematic mapper) и французского спутника SPOT HRV (High Resolution Visible), пришли к выводу что, несмотря на более высокие пространственные характеристики HRV, снимки TM являются более приемлемыми для оценки лесов. Ряд работ посвящен возможности определения таксационных показателей (возраста, сомкнутости полога, высоты деревьев) по спектральным характеристикам изображений Landsat. В частности, была проанализирована взаимосвязь между значениями спектральной яркости каналов Landsat ETM+ и таксационными показателями коммерческих посадок сосны ладанной (*Pinus taeda* L.) в восточной части штата Техас [2]. Для моделирования показателей возраста и густоты насаждений была применена многовариантная регрессия. Линейная комбинация NDVI, ETM4/ETM3 (отношение каналов 3 и 4 ETM+) и индекса влажности функции «колпачок с кисточкой» (tasseled cap) показала наилучшую экстраполяцию возраста насаждения ($R^2 = 78\%$), чем другие комбинации спектральных каналов и соответствующих индексов. Результаты принципиального компонентного анализа (principal component analyses), проведенного для спелого насаждения (старше 18 лет), показали достоверную информацию о связи между структурой полога древостоя и спектральными значениями, полученными сенсором ETM+. M.E. Jakubauskas и K.P. Price (1997) исследовали взаимосвязь между показателями насаждений сосны скрученной широкохвойной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm.) Националь-

ного парка Йеллоустон и спектральных характеристик Landsat TM [3]. Они пришли к заключению, что характеристики лесных насаждений можно дешифрировать по спутниковым данным, а инфракрасный спектральный канал является наиболее информативным при выполнении таких задач.

Создание модели непрерывных переменных (continuous variable model) является одним из подходов, основанных на эмпирической модели непрерывной оценки показателей древостоя [4]. Результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на сложность в точности определения таксационных показателей по данным дистанционного зондирования, они имеют близкие значения с данными исследований по Финляндии [5] и Канаде [6, 7].

В штате Висконсин были выявлены зависимости между лесной биомассой и вегетационными индексами с помощью спутника Landsat 7 [8]. В Индии разработана карта растительного покрова и биологической продуктивности лесов по данным спутника IRS-1A [9]. Среди других разработок по картированию растительного покрова Северной Евразии следует отметить карту земной поверхности SPOT-VEGETATION [10,11], атлас приграничных лесов World Forest Watch [12] и тематическую карту Марийского лесного Заповья на 15 классов растительного покрова, разработанную учеными из Поволжского государственного технологического университета [13, 14].

Литературный анализ по оценке тематического картирования растительного покрова показывает, что существуют большие расхождения между различными исследованиями, а валидация данных на региональном уровне остается важным моментом для оценки точности карт растительного покрова. Много вопросов вызывает точность тематического картирования лесных насаждений по спутниковым снимкам среднего разрешения. Несмотря на рост методов по распознаванию

наземного покрова, производство точных карт изменений в региональном земле- и лесопользовании остается сложным вопросом. Глобальные обобщения (компиляции) региональных проектов по изучению изменений в наземном покрове выявляют проблему их несовместимости и свидетельствуют о необходимости улучшения картирования растительного покрова и его изменений, а также понимания причин таких трансформаций.

Целью работы явилась разработка и оценка методики тематического картирования и стратификации лесного покрова региона Марийского Заволжья по данным спутниковых снимков Landsat 7 (ETM+), для выполнения которой решались следующие **задачи**:

- создать легенду классов (страт) тематической карты, максимально соответствующей единой схеме стратификации лесов Российской Федерации;
- провести классификацию спутниковых снимков с построением тематической карты распределения насаждений по составу, возрасту и полноте;
- провести оценку точности полученных тематических карт и сравнить их с данными официальных источников.

Техника эксперимента и методика исследований. Объектами исследований явились насаждения, расположенные на территории Марийского лесного Заволжья, включая Суслонгерское лесничество, национальный парк Марий Чодра и заповедник Большая Кокшага. Сбор и обработка наземных данных о растительном покрове лесных насаждений для оценки точности и валидации разрабатываемых карт осуществлялась в полевые сезоны с 2008 по 2013 г. Данные для тестовых участков, наиболее характерных для исследуемой местности, были получены методом глазомерно-измерительной таксации в различных древостоях с их географической привязкой на местности и выявлением на спутниковых снимках [15]. Основными количественными показателями

древостоев были их средние значения: высота, диаметр, возраст преобладающей породы, состав и относительная полнота насаждения. В работе также были использованы следующие данные: 1) планы лесонасаждений масштаба 1:250 000 и лесотаксационные описания лесничеств РМЭ; 2) топографические карты масштаба 1:200 000; 3) данные Министерства лесного хозяйства РМЭ; 4) мультиспектральные данные высокого разрешения со спутников Rapid Eye (6 м/пикс) и Alos (10 м/пикс). Собранные сведения помогли создать ГИС-базу данных тестовых участков, репрезентативно представляющую все типы лесных насаждений (до 30 на каждый класс легенды) на всю территорию исследования.

Для работы были подобраны пять мультиспектральных снимков Landsat ETM+ , сделанные в летний период 2001 года. Подбор этой серии снимков в первую очередь был обусловлен отсутствием облачности над исследуемой территорией (рис. 1). Основной снимок Landsat ID: LE71720212001130SGS00, покрывающий большую часть Марийского лесного Заволжья, был произведен 10 мая 2001 года. Работа со снимками проводилась в программных пакетах ENVI-5.0 и ArcGIS-10. Спутниковые снимки прошли стандартный уровень 1G геометрической и радиометрической калибровки. Для формирования однородных изображений на исследуемую территорию для всех снимков Landsat была проведена атмосферная коррекция в модуле FLAASH программного комплекса ENVI-5.0.

В работе был применен метод преобразования Tasseled Cap («колпачок с кисточкой»), который является одним из эффективных методов обработки мультиспектральных снимков, позволяющим улучшить результаты дешифрирования характеристик физических свойств растительности. Этот алгоритм представляет собой эмпирическое линейное преобразование шести каналов мультиспектрально-

го изображения в три отдельных изображения (яркость, зеленость и влажность), обычно используемых при изучении растительного покрова [16, 17]. Преобразование Tasseled Cap можно рассматривать как обобщенный вариант метода главных компонент, который позволяет выполнять переход из пространства измерений спектральных характеристик объектов в пространство признаков, связанных со свойствами заданного класса объектов (рис. 2).

Пространство признаков (brightness – яркость, greenness – зеленость, 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 определенный цвет (например, лиственная растительность представлена голубым тоном, а хвойная – более темными тонами).

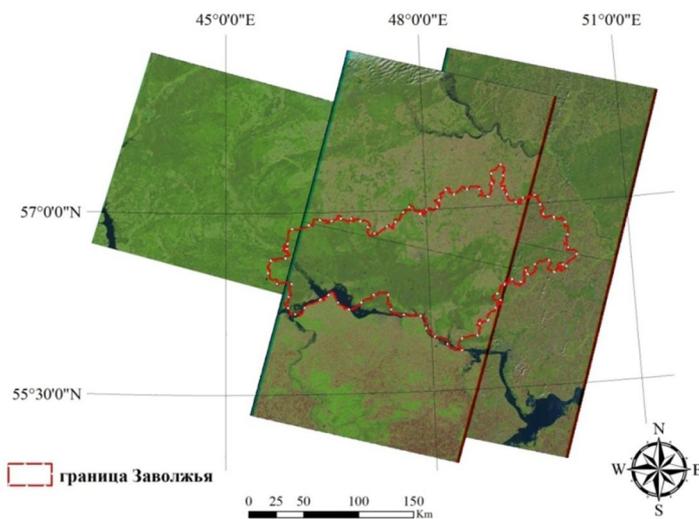


Рис 1. Бесшовная мозаика снимков Landsat ETM+ летнего периода 2001 года (синтез 1, 2 и 3 каналов)

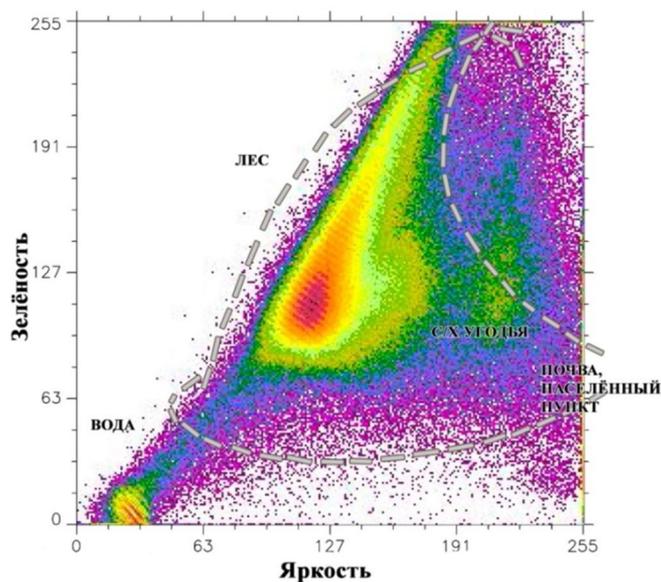


Рис. 2. Пространство признаков спектральных значений индексов Tasseled Cap для различных типов наземного покрова

На основе наших предыдущих исследований [18], делимости спектральных классов и данных ГИЛ (государственной инвентаризации лесов) была создана легенда классов лесного покрова Марийского лесного Заволжья. Разработанные классы сравнивались с соответствующими стратами, применяющимися для стратификации лесов Российской Федерации при проведении государственной инвентаризации лесов [19]. Легенда карты включает 15 классов, образующих страты хвойных, лиственных и смешанных лесов, распределенных по возрасту, производительности и относительным полнотам, молодняки естественного и искусственного происхождения, а также прочие древесные породы и кустарники. Классы земель, не покрытые растительностью, были удалены в виде масок из тематической обработки.

При тематическом картировании для классификации спутниковых изображений использовался алгоритм неуправляемой классификации ISODATA, который позволил выделить пять классов основных видов наземного покрова для изучаемой территории. Это в свою очередь позволи-

ло выделить тематический слой (маску) лесного покрова, который в дальнейшем прошел процедуру управляемой классификации методом опорных векторов (SVM – Support Vector Machine) [20]. Метод SVM, основанный на работе не с центрами кластеров, а с их границами, позволяет максимально разделить изображение на различные страты, что также представляет собой большой потенциал для высокоточной классификации мультиспектральных данных ДЗЗ [21–23]. Пошаговая оценка точности классификации проводилась на основе коэффициентов матрицы различий (Confusion Matrix) и Каппа (Kappa Index), которые наиболее используются в современной научной литературе.

Результаты исследований. В результате классификации маски лесного покрова, полученной на снимках Landsat ETM+ 2001 г. с их последующей генерализацией и объединением близких по спектральным значениям классов в программном комплексе ArcGis-10, были получены тематические карты Марийского Заволжья для различных классов (страт) лесного покрова и определены их площади (рис. 3).

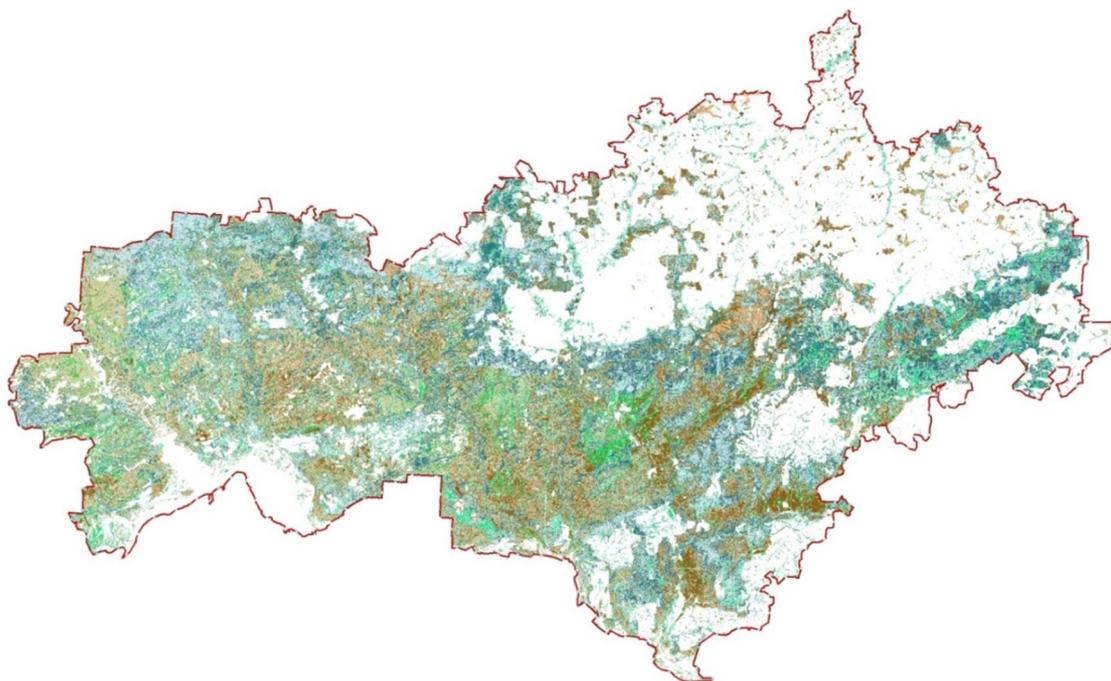


Рис. 3. Тематическая карта лесов Марийского Заволжья (классы легенды приведены в табл.)

Основные страты лесов Марийского Заволжья

Наименование класса по стратам	Цвет	Площадь	
		тыс. га	%
Хвойные спелые и перестойные высокопроизводительные, высокополнотные		217,9	15,8
То же, среднеполнотные		14,5	1,0
Хвойные спелые и перестойные среднепроизводительные, низкополнотные		11,2	0,8
Хвойные средневозрастные высокопроизводительные, высокополнотные		68,7	5,0
То же, среднеполнотные		121,6	8,8
Лиственные спелые и перестойные высокопроизводительные, высокополнотные		56,5	4,1
То же, среднеполнотные		140,5	10,2
Лиственные средневозрастные высокопроизводительные, среднеполнотные		225,4	16,3
Смешанные средневозрастные высокопроизводительные, высокополнотные		274,9	19,9
То же, среднеполнотные		106,8	7,7
Молодняки естественного и искусственного происхождения		139,9	10,1
Прочие древесные породы и кустарники		3,6	0,3
ИТОГО		1381,5	100,0

В целом по результатам исследований лесистость Марийского Заволжья составила 60,0 % (1381,5 тыс. га), что незначительно выше официальных данных (57 %)[24]. На все хвойные страты (без молодняков) приходится 433,9 тыс. га (31,4 %), лиственные (без молодняков) – 381,7 тыс. га (27,6 %) и смешанные насаждения – 381,7 тыс. га (27,6 %). Более половины от лесной площади приходится на средневозрастные и приспевающие насаждения (57,7 %, или 797,4 тыс. га). Значительная часть лесного фонда изучаемой территории (63,1 %) представлена среднеполнотными насаждениями. Низкополнотные насаждения в большей степени составляют хвойную страту (11,2 тыс. га), а на молодняки I группы приходится 10,1 % тыс. га. Полученные данные по распределению лесных страт по площади в целом соответствуют данным государственного справочника о лесном фонде Республики Марий Эл [25].

Проведенное исследование свидетельствует о том, что отдельные спек-

тральные индексы различных древесных пород показывают высокий уровень корреляции с возрастом насаждения (0,68 и выше). Данная связь имеет вид строгой обратной линейной зависимости, снижаясь с возрастом насаждения. Эти данные и полученные линейные зависимости уже на предварительном этапе обработки спутниковых данных позволяют выявлять тематические классы лесного покрова, которые достаточно хорошо выделяются при стандартном дешифрировании (классификации) наземного покрова. Тем не менее, наибольшее затруднение при обобщении классов (страт) в процессе управляемой классификации по методу опорных векторов вызвали пороговые значения спектральных яркостей между молодняками и средневозрастными (приспевающими) насаждениями. Для более детального исследования и выявления порогового значения делимости этих классов требуются дополнительные исследования с привлечением спутниковых снимков более высокого разрешения.

Оценка общей точности классификации и коэффициент Каппа составили 81,25 % и 0,78 соответственно, что свидетельствует о высокой достоверности полученных данных.

Выводы

1. Исследования показали значимость и высокую приемлемость данных среднего разрешения Landsat ETM+ и современных программных геоинформационных комплексов ENVI и ArcGIS для тематического картирования и стратификации лесов.

2. Комбинирование подходов по трансформации изображения методом Tasseled Cap «колпачка с кисточкой» и тематической классификации по методу

опорных векторов позволяет повышать разделимость классов наземного покрова на спутниковых снимках среднего разрешения.

3. Достоверность исследований и тематического картирования обеспечивают полевые материалы и данные лесоустройства. На каждый изучаемый класс (страту) приходится до 30 тестовых участков, что обеспечивает приемлемую точность работ.

4. Разработанная методика по тематическому картированию и стратификации насаждений будет полезна специалистам при государственной инвентаризации лесов, мониторинге за лесным фондом, лесоустройстве и научной деятельности.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, соглашение № 14.В37.21.1245 Министерства образования и науки Российской Федерации «Дистанционный мониторинг и прогнозирование состояния лесных насаждений по спутниковым снимкам» и тематического плана Министерства науки и образования РФ на 2012-2014 гг. «Оценка, мониторинг и прогнозирование биологической продуктивности лесов по данным спутниковой съемки».

Список литературы

1. *Cohen, W.B.* Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and Spot imagery / W.B. Cohen, T.A. Spies // *Remote Sensing of Environment*. – 1992. – No 41 (1). – P. 1–17.
2. *Sivanpillai, R.* Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data / R. Sivanpillai, T.S. Charles, R. Srinivasan, M.G. Messina, X.B. Wu // *Forest Ecology and Management*. – 2006. – No 223. – P. 247–254.
3. *Jakubauskas, M.E.* Empirical relationships between structural and spectral factors of Yellowstone Lodgepole pine forests / M.E. Jakubauskas, K.P. Price // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1997. – No 63. – P. 1375–1381.
4. *Cohen, W.B.* Modeling forest cover attributes as continuous variables in a regional context with Thematic Mapper data / W.B. Cohen, T.K. Maier-sperger, T.A. Spies, D.R. Oetter // *International journal of remote sensing*. – 2001. – No 22. – P. 2279–231.
5. *Hyypä, J.* Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes / J. Hyypä, H. Hyypä, M. Inkinen, M. Engdahl, S. Linko, Y.H. Zhu // *Forest Ecology and Management*. – 2000. – No 128. – P. 109–120.
6. *Hansen, M.J.* Forest structure classification in the North Columbia mountains using the Landsat TM Tasseled Cap wetness component / M.J. Hansen, S.E. Franklin, C. Woudsma, M. Peterson // *Canadian Journal of remote Sensing*. – 2001. – No 27. – P. 20–32.

References

1. *Cohen W.B., Spies T.A.* Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and Spot imager. *Remote Sensing of Environment*. 1992. No 41 (1). P. 1–17.
2. *Sivanpillai R., Charles T.S., Srinivasan R., et al.* Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data. *Forest Ecology and Management*. 2006. No 223. P. 247–254.
3. *Jakubauskas M.E., Price K.P.* Empirical relationships between structural and spectral factors of Yellowstone Lodgepole pine forests. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1997. No 63. P. 1375–1381.
4. *Cohen W.B., Maier-sperger T.K., Spies T.A., Oetter D.R.* Modeling forest cover attributes as continuous variables in a regional context with Thematic Mapper data. *International journal of remote sensing*. 2001. No 22. P. 2279–231.
5. *Hyypä J., Hyypä H., Inkinen M., et al.* Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management*. 2000. No 128. – P. 109–120.
6. *Hansen M.J., Franklin S.E., Woudsma C., Peterson M.* Forest structure classification in the North Columbia mountains using the Landsat TM Tasseled Cap wetness component. *Canadian Journal of remote Sensing*. 2001. No 27. P. 20–32.

7. Gerylo, G.R. Empirical relations between Landsat TM spectral response and forest stands near Fort Simpson, Northwest Territories, Canada / G.R. Gerylo, R.J. Hall, S.E. Franklin, L. Smith // Canadian Journal of remote Sensing. – 2002. – No 28. – P. 68–79.
8. Zheng, D. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA / D. Zheng, J. Rademacher, J. Chen, et al. // Remote sensing of environment. – 2004. – No 93. – P. 402–411.
9. Tiwari, A.K. Mapping forest biomass through digital processing of IRS-1A data / A.K. Tiwari // International journal of remote sensing. – 1994. – No 15. – P. 1849–1866.
10. 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. – P. 1977–1982.
11. Барталев, С.А. Разработка информационной системы поддержки мониторинга состояния и динамики наземных экосистем Северной Евразии по данным спутниковых наблюдений / С.А. Барталев, М.А. Бурцев, Е.А. Лупян и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – № 1. – С. 131–139.
12. Aksenov, D. Atlas of Russia's Intact Forest Landscapes / D. Aksenov, D. Dobrynin, M. Dubinin, et al. // Biodiversity Conservation Center, Greenpeace Russia, International Socio-Ecological Union. – Moscow: World Resources Institute, 2002. – URL: http://pdf.wri.org/gfw_atlas_full.pdf
13. 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.
14. 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.
15. 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. – 2011. – № 3 (13). – С. 17–24.
7. Gerylo G.R., Hall R.J., Franklin S.E., et al. Empirical relations between Landsat TM spectral response and forest stands near Fort Simpson, Northwest Territories, Canada. Canadian Journal of remote Sensing. 2002. No 28. P. 68–79.
8. Zheng D., Rademacher J., Chen J., et al. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. Remote sensing of environment. 2004. No 93. P. 402–411.
9. Tiwari A.K. Mapping forest biomass through digital processing of IRS-1A data. International journal of remote sensing. 1994. No 15. P. 1849–1866.
10. 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. P. 1977–1982.
11. Bartalev S.A., Burtcev M.A., Lupyan E.A., et al. Razrabotka informatsionnoi sistemi podderzhki monitoringa sostoyaniya i dinamiki nazemnikh ekosistem Severnoi Evrazii po dannim sputnikovikh nabludenii [Development of information system for supporting monitoring of conditions and dynamics of terrestrial ecosystems in Northern Eurasia on the base of satellite observations]. Sovremennye problemi distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa [Actual problems in remote sensing of the Earth from space]. 2004. No 1. P. 131–139.
12. Aksenov D., Dobrynin D., Dubinin M. Atlas of Russia's Intact Forest Landscapes. Biodiversity Conservation Center. International Socio-Ecological Union, World Resources Institute, Moscow, Russia. - 2002. – URL: http://pdf.wri.org/gfw_atlas_full.pdf
13. Kurbanov E.A., Nureeva T.V., Vorobyev O.N., etc. Distantsionnyy monitoring dinamiki narusheniya lesnogo pokrova, lesovozobnovleniya i lesovostanovleniya v Mariyskom Zavolzhe [Remote Monitoring of Dynamics of Forest Cover Disturbances, Afforestation and Reforestation in Mari Zavolgie]. Vestnik MarGTU. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie [Vestnik of MarSTU, Series: Forest. Ecology. Nature Management]. 2011. No 3(13). P. 17–24.
14. Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V., etc. Distantsionnyy monitoring lesnykh garey v Mariyskom Zavolzhe [Remote Monitoring of Burnt areas in Mari Zavolgie]. Vestnik MarGTU. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie [Vestnik of MarSTU, Series: Forest. Ecology. Nature Management]. 2012. No 1 (15). P. 12–22.
15. Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Gubaev A.V., etc. Otsenka zarastaniya zemel zapasa Respubliki Mariy El lesnoy rastitelnostyu po sputnikovym snimkam [Assessment of Forest invasion on Reserve Lands of the Republic Mari El by Satellite Images]. Vestnik

- ситета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование.– 2010. – № 2(9). – С. 14-20.
16. *Crist, E.P.* A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data / E.P. Crist // Remote Sensing of Environment. – 1985. – No 17. – P. 301-306.
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. – No 97. – P. 301 – 310.
18. *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>
19. *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 25.08.2013).*
20. *Vapnik, V.N.* The Nature of Statistical Learning Theory / V. N.Vapnik. – 2nd edition. – New York: Springer-Verlag, 2000. – 314 p.
21. *Sluiter, R.* Comparing techniques for vegetation classification using multi- and hyperspectral images and ancillary environmental data / R. Sluiter, E.J. Pebesma // International Journal of Remote Sensing. – 2010. – Vol. 31, No 23.– P. 6143-6161.
22. *Townshend, J.R.* Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges / J.R. Townshend, J.G. Masek, C. Huang, E.F. et al. // International Journal of Digital Earth. – 2012. – Vol. 5, No. 5. – P. 373-397.
23. *Крылов, А.М.* Выявление и оценка площадей катастрофических ветровалов 2009-2010 гг. по данным космической съемки / А.М. Крылов, Е.Г. Малахова, Н.А. Владимирова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – СПб.: СПб ГЛТУ. – 2012. – Вып. 200.– С. 197-207.
24. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Марий Эл в 2000 году. – Йошкар-Ола: Министерство при-
- MarGTU. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie [Vestnik of MarSTU, Series: Forest. Ecology. Nature Management]. 2010. No 2(9). P. 14-20.
16. *Crist E.P.* A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data. Remote Sensing of Environment. 1985. No 17. P. 301-306.
17. *Healey S.P., Cohen W.B., et al.* Comparison of Tasseled Cap-Based Landsat Data Structures for Use in Forest Disturbance Detection. Remote Sensing of Environment. 2005. No 97. P. 301 – 310.
18. *Gubaev A.V., Kurbanov E.A., Vorobyev O.N. et al.* Klassificaciya nazemnogo pokrova Srednego Povolgiya po sputnikovim snimkam srednego razresheniya [Classification of land cover in Middle Zavolgie by satellite imagies of middle resolution]. Lesnie ecosystemy v usloviyah izmeneniya klimata: biologicheskaya productivnost i distancionnii monitoring. Materiali mezhdunarodnogo nauchno-practicheskogo seminarara [Forest ecosystems in the conditions of climate change: biological productivity and remote sensing. Proceedings of international scientific-practical seminar] Yoshkar-Ola: MarSTU. 2011. C. 7-19. <http://csfm.marstu.net/publications.html>
19. Metodicheskiye rekomendacii po provedeniyu gosudarstvennoi inventarizacii lesov: utverzdeni prikazom Rosleshoza 10.11.2011 № 472 [Methodological recommendations for carrying out state forest inventory: approved by the order of Rosleshoz 10.11.2011 № 472]. 2011. <http://www.rosleshoz.gov.ru/docs/leshoz/199> (reference date: 25.08.2013).
20. *Vapnik V.N.* The Nature of Statistical Learning Theory. 2nd edition. New York: Springer-Verlag. 2000. 314 p.
21. *Sluiter R., Pebesma E.J.* Comparing techniques for vegetation classification using multi- and hyperspectral images and ancillary environmental data. International Journal of Remote Sensing. 2010. Vol. 31. No 23. P. 6143-6161.
22. *Townshend J.R., Townshend J.R., Masek J.G., et al.* Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges. International Journal of Digital Earth. Vol. 5, No. 5. 2012. P. 373-397.
23. *Krilov A.M, Malakhova E.G., Vladimirova N.A.* Viyavlenie i otenka ploshadei katastroficheskikh vetrovalov 2009-2010 po dannim kosmicheskoi syemki [Determination and estimation of catastrophic wind thrown areas by space images]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotechnicheskoi akademii [Proceedings of Saint-Petersburg forest academy]. SPbGLTU. No 200. 2012. P. 197-207.
24. Gosudarstvenniy doklad o sostoyanii okruzhayushei proronoi sredi Respubliki Mari El v 2000 godu [State report on environment in Republic Mari El

родных ресурсов РФ, Комитет природных ресурсов по Республике Марий Эл, 2001. – 151 с.

25. Лесной фонд России (по данным государственного учета лесного фонда по состоянию на 01.01.1998 г.): Справочник / Под редакцией В.В. Страхова и др. – М.: ВНИИЦлесресурс, 1999. – 650 с.

in 2000]. Yoshkar-Ola. Ministerstvo prirodnikh resursov RF. Komitet prirodnikh resursov po respublike Mari El [Yoshkar-Ola. Ministry of natural resources of RF. Committee of natural resources of Republic Mari El]. 2001.151 p.

25. Lesnoi fond Rossii (po dannim gosudarstvennogo ucheta lesnogo fonda po sostoyaniyu na 1.01.1998) [Forest fund of Russia (data of the state report on forest fund for the 1.01.1998)]. VNIIT-Clesresurs. 1999. 650 p.

Статья поступила в редакцию 08.07.13.

КУРБАНОВ Эльдар Аликрамович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства, руководитель международного Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – устойчивое управление лесами, дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем, депонирование углерода лесными экосистемами, леса Киото. Автор более 120 научных и учебно-методических работ.

E-mail: kurbanovea@volgatech.net

ВОРОБЬЕВ Олег Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов, депонирование углерода лесными экосистемами, мониторинг лесных экосистем. Автор более 50 научных и учебно-методических работ.

E-mail: vorobievon@volgatech.net

НЕЗАМАЕВ Сергей Александрович – аспирант кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов, биологическая продуктивность лесов. Автор 15 публикаций.

E-mail: nezamayeysa@volgatech.net

ГУБАЕВ Александр Владимирович – соискатель кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 15 публикаций.

E-mail: galex@volgatech.net

ЛЕЖНИН Сергей Анатольевич – специалист Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 34 публикаций.

E-mail: lejninsa@volgatech.net

ПОЛЕВЩИКОВА Юлия Александровна – программист кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 15 публикаций.

E-mail: polevshikovaya@volgatech.net

KURBANOV Eldar Alikramovich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Chair of Forestry, Head of the Centre of Sustainable Forest Management and Remote Sensing, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). Research interests – sustainable forest management, remote sensing, biological productivity of forest ecosystems, carbon sequestration by the forest ecosystems, Kyoto forests. The author of more than 120 scientific publications and textbooks.

E-mail: kurbanovea@volgatech.net

VOROBYEV Oleg Nikolayevich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Chair Forestry, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). Research interests – forest remote sensing, carbon sequestration by the forest ecosystems, forest ecosystems monitoring. The author of more than 50 scientific publications and textbooks.

E-mail: vorobievon@volgatech.net

NEZAMAIEV Sergey Alexandrovich – Postgraduate Student at the Chair Forestry, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). Research interests – forest remote sensing, biological productivity of forests. The author of 15 publications.

E-mail: nezamayevs@volgatech.net

GUBAYEV Aleksandr Vladimirovich – PhD student of the forestry Chair, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). Research interests – forest remote sensing, biological productivity of forests. The author of 15 publications.

E-mail: galex@volgatech.net

LEZHININ Sergey Anatolyevich – Specialist of the Centre of sustainable forest management and remote sensing, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). Research interest – forest remote sensing, biological productivity of forests. The author of 34 publications.

E-mail: lejninsa@volgatech.net

POLEVSHCHIKOVA Yuliya Alexandrovna – Programmer at the Chair of Forestry, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). Research interest – remote sensing, biological productivity of forest ecosystems. The author of 15 publications.

E-mail: polevshikovaya@volgatech.net

*E. A. Kurbanov, O. N. Vorobyev, S. A. Nezamayev,
A. V. Gubayev, S. A. Lezhnin, Y. A. Polevshikova*

THEMATIC MAPPING AND STRATIFICATION OF FORESTS IN MIDDLE ZAVOLSGIE BY LANDSAT SATELLITE IMAGES

Key words: *thematic mapping; forest stands; remote sensing; Landsat satellite images, GIS, monitoring of forests.*

A new methodology of thematic mapping of forest cover on the base of Landsat satellite images with identification of classes by forest species, age and basal area of the forest fund was developed. Thematic mapping is based on the complex approach with the use of tasseled cap transformation of satellite images and more advanced identification of the land cover classes by the method of support vector machine of the unsupervised classification. The developed methodology was applied and estimated on the territory of Mari forest Zavolgie on the base of satellite images of 2001. Accuracy assessment of the thematic mapping based on the test sites and materials of forest inventory showed high validation of the developed maps ($\kappa = 0,78$). The research shows that some spectral indexes showed high correlation with the stand age (coefficient is 0,68 and higher). The forest cover area in Middle Zavolgie is 60,0 %, which is a bit higher than official data (57 %). All conifer thematic classes (without the young trees) consist of 433,9 thousand ha (31,4 %) of the forested area, broadleaved species – 381,7 thousand ha (27,6 %) and mixed stands - 381,7 thousand ha (27,6 %). Important part of the forested area in Middle Zavolgie is represented by the stands with middle values of basal area (57,7 %). Stands with small values of basal area are represented by the conifer classes (11,2 thousand ha), while young trees of I class constitute 10,1 % of the investigated territory. All received results on the thematic forest classes with the use of satellite Landsat images are basically coincide with the data of official statistics of forest inventory for the Republic Mari El.