

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

СПОСОБ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ
В ЛЕСАХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПО РЯДАМ РАЗНОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

© 2013 г. Э. А. Терехин

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга объектов
и природных ресурсов, Белгород*

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Поступила в редакцию 14.01.2013 г.

На основе анализа серий многозональных снимков Landsat TM предложен способ картографирования многолетних изменений, происходящих в лесах. Оценку изменений, связанных со сплошнолесосечными вырубками, предполагается проводить на уровне таксационных выделов лесных массивов. В основу способа положено изучение динамики значений спектральной яркости среднего инфракрасного (ИК) диапазона (1.55–1.75 мкм), связанное с изменениями, происходящими в лесах. На примере лесных массивов Белгородской обл. выполнена апробация предложенного способа для картографирования сплошных лесосечных рубок, проводившихся в период с 1986 по 2009 г.

Ключевые слова: лесные насаждения, спутниковые снимки, спектральные яркости, многолетние изменения, Белгородская область

DOI: 10.7868/S0205961413050102

ВВЕДЕНИЕ

Изменения, происходящие в лесах, могут быть связаны с динамикой площадей и структуры лесопокрытых земель территории, в том числе со сплошнолесосечными рубками, лесными пожарами, гибелью древостоев от негативных природных и антропогенных факторов. По данным Рослесхоза, в России в 2011 г. государственными лесными инспекторами было выявлено 21.3 тыс. случаев незаконной рубки лесных насаждений с объемом 1.2×10^6 м³. Площадь лесных пожаров в 2012 г. на 20% превысила показатель прошлого года. В связи с этим приобретает актуальность разработка эффективных способов контроля изменений, происходящих в лесах. При этом ключевым моментом является разработка способов, характеризующихся максимальной степенью автоматизации. Перечисленные выше типы изменений, происходящих в лесах, могут быть успешно дешифрованы визуальным способом по многозональным снимкам высокого пространственного разрешения (Boyd, 2005). Однако визуальный способ в значительной степени субъективен, трудоемок и во многих случаях не позволяет проводить оценку на количественном уровне, что

определяет необходимость разработки автоматизированных способов детектирования изменений.

К настоящему времени по проблеме анализа многолетней динамики в лесах выполнен ряд исследований, связанных с новыми подходами использования классификаций спектральных признаков изображений (Барталев, 2005; Virk, 2006; Karia, 2006; Jupiter, 2008), применения анализа спектральных смесей (Lu, 2004), разностных значений спектральных индексов (Панова, 2005; Kozak, 2007; Барталев, 2010). Для анализа динамики в лесах исследованы также возможности линейных спектральных преобразований каналов спутниковых данных (Franklin, 2002, 2005). Институтом космических исследований (ИКИ РАН) разработан веб-сервис, позволяющий на основе данных MODIS идентифицировать очаги пожаров на региональном уровне. В то же время с лесоэксплуатационной точки зрения актуальной остается необходимость разработки высокодетальных способов, позволяющих оценивать разноплановые изменения, происходящие в лесах, на уровне отдельных лесных массивов, их кварталов и выделов.

В настоящей работе приводятся описание и результаты применения нового способа, основанного на анализе динамики значений спектральной ярко-



Рис. 1. Схема способа автоматизированной оценки многолетних изменений в лесах.

сти среднего ИК-диапазона (1.55–1.75 мкм). Указанный диапазон является информативным для изучения группы биофизических параметров лесных насаждений, что было установлено на основе оценки лесных массивов, типичных для лесостепной провинции Среднерусской возвышенности (Терехин, 2012).

Актуальность подобных исследований обусловлена также тем, что в России, обладающей значительными лесными ресурсами, основное внимание уделяется контролю лесов таежной зоны и зоны смешанных лесов, в которых ведутся основные лесозаготовки. Дистанционному изучению лесов лесостепной зоны уделяется значительно меньшее внимание, несмотря на то, что они играют огромную экологическую роль.

В связи с этим на основе анализа и обработки изображений Landsat TM предложен автоматизированный способ, позволяющий с помощью оценки спектральных яркостей лесных массивов по разновременным сериям спутниковых изображений выявлять и количественно оценивать изменения, происходящие в лесных насаждениях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Способ предполагает совместное использование спутниковых материалов и геоинформационных технологий, интеграция которых поз-

воляет проводить детальную оценку изменений, происходящих в лесах на уровне отдельных лесотаксационных выделов.

Для выполнения исследований была проанализирована информация с 1551 лесотаксационного выдела лесных массивов, расположенных на территории Белгородской обл. (Борисовский, Шебекинский, Чернянский районы). Исследования проводились в лесах, наиболее широко представленных в лесостепной зоне Центрального Черноземья. Они характеризуются преобладанием дуба обыкновенного в качестве основной лесообразующей породы. На все лесные массивы были получены, отсканированы, географически привязаны и оцифрованы карты лесоустройства, что обеспечило точность и достоверность получения конечного результата.

В предложенном способе детектирование изменений, происходящих в лесах, предлагается анализировать на оценочном уровне в рамках регионов, или субъектов Российской Федерации, либо на более детальном уровне в рамках отдельных лесных массивов и их лесотаксационных выделов (рис. 1). В связи с этим необходимо создание векторного слоя лесов региона либо оцифрованной карты лесоустройства, если речь идет о конкретном лесном массиве.

Блок получения и анализа спутниковой информации (центральная часть схемы) играет в

предложенном способе ключевую роль. Корректную количественную оценку изменений спектральных признаков лесов по снимкам можно проводить только при использовании данных с одного сенсора, например Landsat TM. Причем необходимо, чтобы пространственное и спектральное разрешение снимков позволяло анализировать интересующие изменения. Спутниковые данные должны пройти атмосферную и радиометрическую коррекцию.

Когда речь идет о сопоставлении разновременных данных и извлечении количественных спектральных характеристик из спутниковых изображений, важнейшими этапами их предварительной обработки являются атмосферная и радиометрическая коррекция (Song, 2001). Радиометрическая коррекция (калибровка) – основная предпосылка получения достоверных научных результатов, извлекаемых из обработки данных дистанционного зондирования (ДЗ). Следует отметить, что в ряде операций (например, при классификации спектральных признаков изображения, его визуальном дешифрировании) проведение атмосферной и радиометрической калибровки не обязательно. Вполне достаточно масштабированных значений яркостей снимка – Digital Number (DN). В настоящее время для снимков серии Landsat разработаны и проверены на практике различные методы атмосферной и радиометрической калибровок. Обобщенное описание процедуры для перевода “сырых” значений яркостей снимков серии Landsat–AlI в коэффициенты отражения приведено в статье (Chander, 2009). Для выполнения процедур радиометрической и атмосферной коррекции снимков применяли калибровочные константы для снимков Landsat, приведенные в указанной статье. Это наиболее современная технология, использующая обновленные калибровочные коэффициенты и константы. Атмосферная и радиометрическая коррекция были совмещены и заключались в выполнении следующих двух основных этапов:

1. Перевод исходных “сырых” значений яркостей спутниковых изображений в показатели излучения на сенсоре (radiance). Операцию осуществляли по формуле

$$L_{\lambda} = [(L_{\max} - L_{\min}) / (Q_{cal\max} - Q_{cal\min})] \times (Q_{cal} - Q_{cal\min}) + L_{\min}, \quad (1)$$

где, L_{λ} – количество приходящего излучения; L_{\min} – количество приходящего излучения, масштабируемое в Q_{\min} ; L_{\max} – количество приходящего излучения, масштабируемое в Q_{\max} ; $Q_{cal\min}$ – минимальное калиброванное значение DN (0 или 1); $Q_{cal\max}$ – мак-

симальное калиброванное значение DN (255); Q_{cal} – калиброванное значение (DN).

2. Конвертация показателей излучения на сенсоре в значения коэффициентов отражения, которые скорректированы на угол падения солнечных лучей, среднюю солнечную внеатмосферную энергетическую освещенность. Процедура вычисления безразмерного коэффициента отражения выполнялась по формуле

$$P_p = (\pi L_{\lambda} d^2) / ESUN_{\lambda} \cos \theta_s, \quad (2)$$

где P_p – коэффициент спектральной яркости природного объекта; π – константа, равная приближенно 3.14; L_{λ} – показатели спектрального излучения на сенсоре; d – расстояние от Земли до Солнца в точке получения снимка на момент съемки, в астрономических единицах; $ESUN_{\lambda}$ – средняя солнечная внеатмосферная энергетическая освещенность (Mean Solar Exoatmospheric Spectral Irradiance) в мВт/(см² мкм), или спектральная плотность потока излучения на внешней границе атмосферы; θ_s – зенитный угол Солнца.

Таким образом, все анализируемые снимки пересчитали в атмосферно-откорректированные значения коэффициентов спектральной яркости (TOA Reflectance).

После этапа атмосферной и радиометрической коррекции снимков пользователь получает откалиброванные значения каналов снимка (спектральных диапазонов), которые можно использовать для анализа разновременной динамики и для расчета спектральных индексов.

Этап геоинформационной обработки данных, выполняемый в программном обеспечении ArcGIS, включает создание векторных карт кварталов и лесотаксационных выделов лесных массивов, заполнение их информацией о породном составе, возрасте, бонитете и других таксационных характеристиках насаждений, автоматический анализ спектральных признаков внутрлесных выделов и оценку их динамики.

Ключевым этапом геоинформационной обработки данных является получение усредненных значений спектральных показателей (в нашем случае – значений среднего ИК-диапазона) для лесных массивов либо для их конкретных лесотаксационных выделов и установление пороговых значений, выше или ниже которых произошедшие изменения в спектральных признаках будут соответствовать реально произошедшим изменениям в лесах. На данном этапе необходима верификация значений спектральных показателей с результатами визуального дешифрирования снимка и полевых обследований, по которым устанавливаются произошедшие изменения. Заключительным этапом предложенного способа

Динамика значений коэффициентов отражения среднего ИК-диапазона (1.55–1.75 мкм) в соответствии с происходящими в лесах изменениями

Диапазон и направление изменения значений	Тип изменений
увеличение от 0.019 до 0.051	новые сплошнолесосечные вырубki
снижение от –0.012 до –0.066	имеющиеся зарастающие вырубki
изменение от –0.011 до 0.018	без существенных изменений

является автоматический поиск вырубok, гарей, высохших древостоев по значениям спектральных показателей (среднего ИК-канала).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный способ был апробирован на примере дубравных лесных массивов, типичных для Белгородской обл. Проверка способа предполагала исследование спектральных характеристик лесных массивов за три временных среза по изображениям Landsat TM (13.06.1986 г., 24.06.1996 г. и 28.06.2009 г.), установление связи между значениями среднего ИК-диапазона, поиск лесотаксационных выделов, в которых проводились сплошнолесосечные рубки между анализируемыми датами.

В Белгородской обл. с 1991 г. все леса отнесены к группе I, в связи с этим промышленные сплошнолесосечные рубки в лесах запрещены, за исключением санитарных рубок. По этой причине контроль рубок на территории лесов региона представляет особый интерес. При сплошнолесосечных рубках происходит кардинальное изменение спектрального отклика лесного массива, обусловленное сменой фитоценозов и появлением более молодых деревьев, высаживаемых на месте рубки. Аналогичные изменения спектра отражения происходят при гибели древостоев.

В соответствии с предложенным способом все обрабатываемые изображения прошли этап атмосферной и радиометрической коррекции, после чего их можно было использовать для анализа разновременной динамики в лесах. В качестве спектрального показателя для поиска изменений было использовано изображение в среднем ИК-канале, как наиболее чувствительном к изменениям в возрасте насаждений. Поскольку проверка способа проходила по схеме, предполагающей детальный анализ изменений в рамках отдельных лесотаксационных выделов, были использованы созданные нами векторные карты лесоустройства на анализируемые лесные участки. Площадь исследуемых лесов составила свыше 7000 га. Цифровые карты лесоустройства были привязаны к спутниковым изображениям, что позволило выполнить корректную оценку изменений спек-

тральных характеристик в пределах каждого лесотаксационного выдела.

Значения коэффициентов отражения в канале 5 (среднем ИК), полученные для каждого выдела по каждому временному срезу, послужили основой для оценки произошедших изменений.

Ключевым этапом исследования было установление соотношения между происходящими в лесах изменениями, например, вновь появляющимися сплошнолесосечными вырубками, гибелью древостоев от пожаров и соответствующей им динамикой значений среднего ИК-диапазона. На основе анализа лесов, расположенных в Борисовском районе, было установлено соотношение изменений значений коэффициентов отражения с происходящими изменениями в лесном покрове (таблица).

Полученное соотношение было проверено на примере лесов Шебекинского и Чернянского районов. Оно может применяться для анализа изменений в лесах, имеющий породный состав, близкий к лесам, в которых проводились исследования.

Результаты автоматизированного картографирования новых вырубok за периоды 1986–1996 и 1996–2009 гг. в лесном массиве “Мелкий лес” на основе полученного соотношения значений спектральной яркости среднего ИК-диапазона и происходящими в лесах изменениями представлены на рис. 2, на котором четко видно уменьшение интенсивности рубок после 1991 г.

Результаты картографирования новых рубок на Чернянском и Шебекинском участках (рис. 3, 4) подтвердили универсальность выявленного соотношения и эффективность предложенного способа, также с учетом того, что лесные массивы расположены на расстоянии не менее 100 км друг от друга.

Необходимо отметить, что полученный способ позволяет автоматически выявлять не только новые рубки, но и детектировать уже имеющиеся вырубki разных возрастов.

Сопоставление результатов автоматизированного поиска вырубok с результатами их идентификации путем визуального дешифрирования показало высокую точность способа.

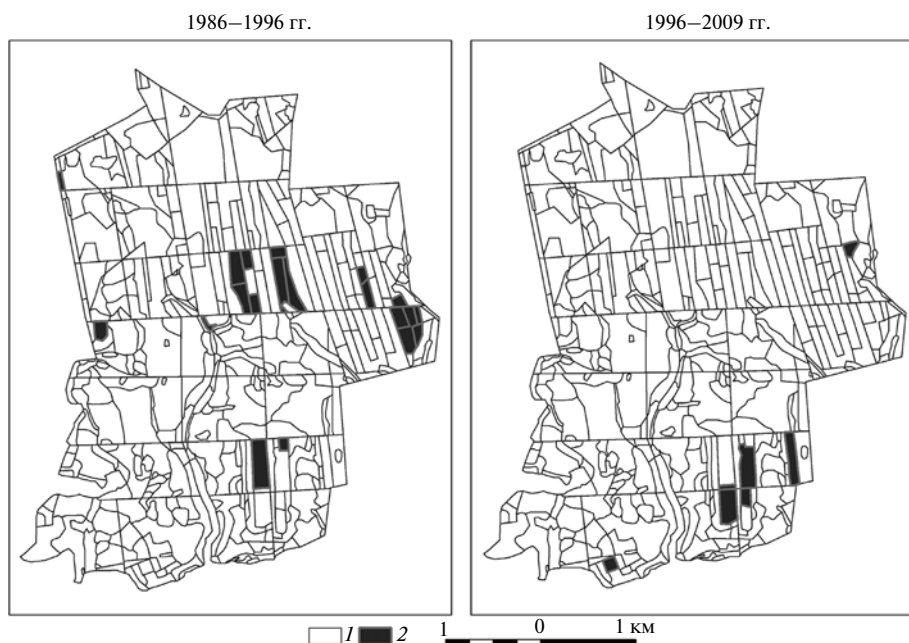


Рис. 2. Сплошнолесосечные рубки лесного массива «Мелкий Лес»: 1 – границы лесотаксационных выделов, 2 – выделов, в которых проводились сплошнолесосечные рубки.

Достоверно определены 95% лесотаксационных выделов, где проводились новые сплошнолесосечные рубки. Ограничения предложенного способа в первую очередь связаны с тем, что снижается вероятность автоматической идентификации сплошной вырубке, если она охватывает не весь лесотаксационный выдел. Это обусловлено тем, что в предложенном способе изменение спектральных характеристик усредняется в границах лесотаксационных выделов.

Усыхание и гибель древостоев также сопровождаются существенными изменениями в спектральном отклике, поэтому его динамика может быть положена в основу для поиска участков гибели насаждений. Однако применение данного способа в этом случае будет ограничено тем, что, как правило, контуры ареалов усыхания не соответствуют сети лесоустройства, и достоверное определение участков погибших древостоев будет выполняться только в том случае, если ареалы усыхания охватывают весь таксационный выдел либо практически всю территорию.

Таким образом, предложенный способ автоматизированного поиска изменений, происходящих в лесах, на основе динамики значений спектральной яркости среднего ИК-диапазона (1.55–1.75 мкм) оказался эффективен для контроля изменений на уровне отдельных лесотаксационных выделов лесных массивов (на приме-

ре дубовых лесных насаждений, типичных для Белгородской обл.).

Необходимо отметить преимущества предложенного способа и его недостатки.

К преимуществам относятся:

- автоматический и быстрый поиск сплошнолесосечных вырубок;
- высокая достоверность обнаружения изменений;
- использование бесплатных спутниковых данных;
- универсальность применения для всех типов лесов, где древостой составляют дубовые и близкие к ним по спектру отражения насаждения;
- использование среднего ИК-канала, прозрачного для дыма, и позволяющего автоматически выявлять изменения при наличии на снимке негустого дымового слоя.

Недостатками способа являются:

- необходимость атмосферной и радиометрической калибровки снимков;
- необходимость применения векторных масок лесотаксационных выделов (для детальных исследований);
- необходимость использования данных, имеющих средний ИК-канал;
- невозможность выявления очень малых рубок, размером менее 0.2–0.4 га.

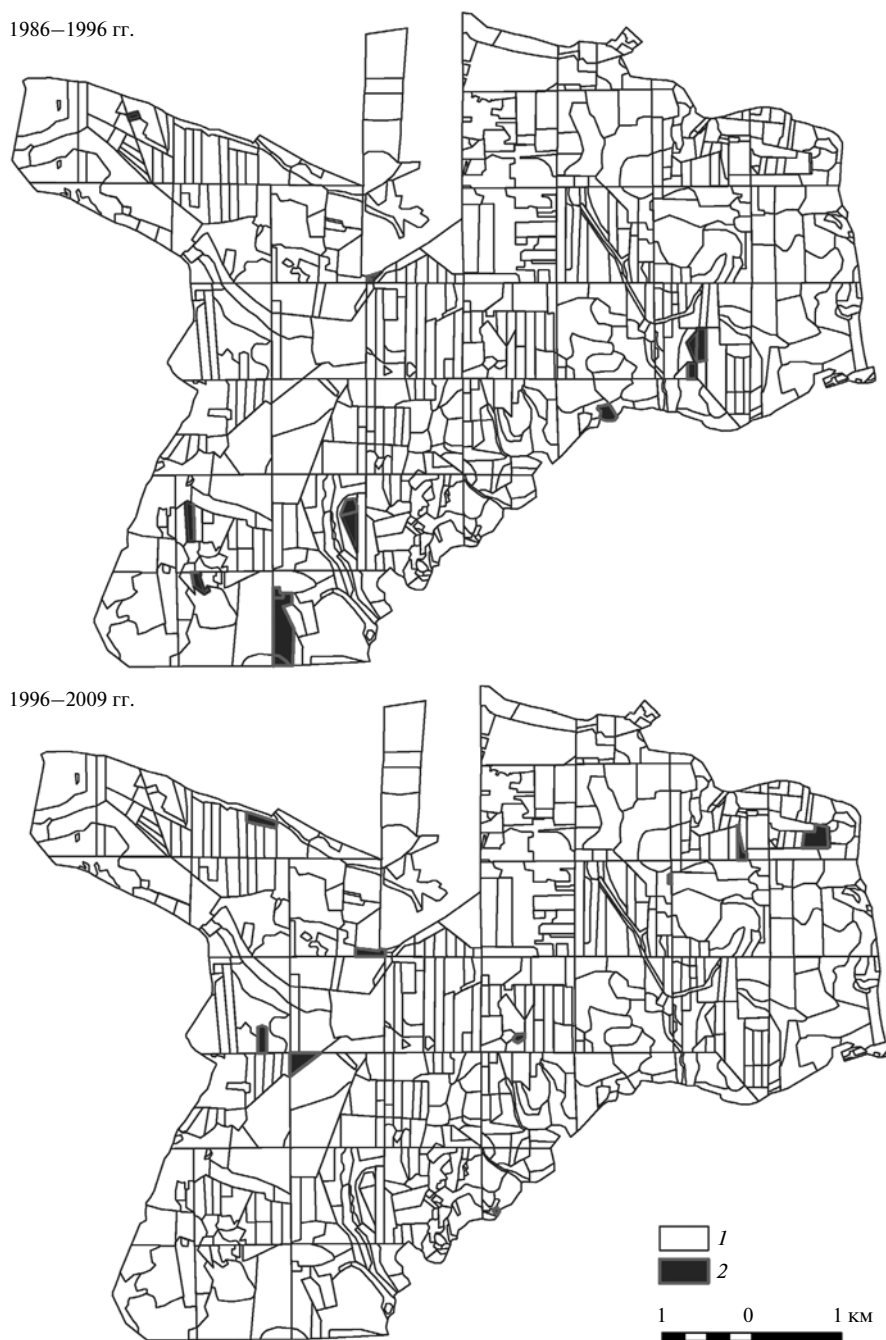


Рис. 3. Сплошнолесосечные рубки лесного массива “Урочище Белянское”: 1 – границы лесотаксационных выделов, 2 – выделы, в которых проводились сплошнолесосечные рубки.

ВЫВОДЫ

Предложен способ геоинформационного картографирования многолетних изменений в лесах на основе анализа их спектральных характеристик по рядам разновременных спутниковых данных. Способ предполагает совместное использование

спутниковых материалов и геоинформационных технологий, интеграция которых позволяет проводить как предварительную оценку изменений в лесах между определенными датами, так и детальную оценку изменений на уровне отдельных таксационных выделов лесных массивов. Способ апробирован на примере лесных насаждений с преоблада-



Рис. 4. Сплошнолесосечные рубки лесного массива “Ездоченская Дача”: 1 – границы лесотаксационных выделов, 2 – выделы, в которых проводились сплошнолесосечные рубки.

нием дуба в качестве основной лесообразующей породы (нагорные дубравы). На тестовых лесных массивах изучена динамика появления и зарастания сплошных лесосечных рубок за период с 1986 по 2009 гг.

Предложенный способ автоматизированного поиска изменений, происходящих в лесах, на основе динамики значений спектральной яркости среднего ИК-диапазона (1.55–1.75 мкм) успешно зарекомендовал себя для контроля изменений на уровне отдельных лесотаксационных выделов (на примере дубовых лесных насаждений, типичных для Белгородской обл.).

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.A18.21.1151 от 14.09.2012 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю. Методы использования временных серий спутниковых изоб-

ражений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 217–227.

Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.

Панова О.В., Ершов Д.В. Использование данных спектро радиометра MODIS для регистрации и учета лесных гарей // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 388–394.

Терехин Э.А. Анализ каналов спутниковых данных LANDSAT TM для оценки характеристик лесных насаждений Лесостепной провинции Среднерусской возвышенности // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 53–61.

Boyd D.S., Danson F.M. Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development // Progr. Phys. Geogr. 2005. V. 29. № 1. P. 1–26.

- Chander G., Markham B., Helder D.L.* Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // *Rem. Sens. Env.* 2009. V. 113. P. 893–903.
- Franklin S., Lavigne M.B., Wulder M.A., McCaffrey T.M.* Large-area forest structure change detection: An example // *Canad. J. Rem. Sens.* 2002. V. 28. № 4. P. 588–592.
- Franklin S., Jagielko C.B., Lavigne M.B.* Sensitivity of the Landsat enhanced wetness difference index (EWDI) to temporal resolution // *Canad. J. Rem. Sens.* 2005. V. 32. № 2. P. 149–152.
- Jupiter S.D., Marion G.S.* Changes in forest area along stream networks in an agricultural catchment of the Great Barrier Reef Lagoon // *J. Env. Manag.* 2008. V. 42. № 1. P. 66–79.
- Karia J.P., Porwal M.C., Roy P.S., Sandhya G.* Forest change detection in Kalarani Round, Vadodara, Gujarat: A remote sensing and GIS approach // *J. Indian Soc. Rem. Sens.* 2006. V. 29. № 3. P. 129–135.
- King D.J., Olthof I., Pellikka K.E., Seed E.D., Butson C.* Modelling and mapping damage to forests from an ice storm using remote sensing and environmental data // *Natural Hazards.* 2005. V. 35. № 3. P. 321–342.
- Lu D., Mausel P., Batistella M., Moran E.* Multitemporal spectral mixture analysis for Amazonian land-cover change detection // *Canad. J. Rem. Sens.* 2004. V. 30. № 1. P. 87–100.
- Sader S.A., Sever J.C., Smoot M., Richards T.* Forest change estimates for the Northern Peten Region of Guatemala 1986–1990 // *Human Ecol.* 1994. V. 22. № 3. P. 317–332.
- Song C., Woodcock C.E., Seto K.C., Lenney M.P., Macomber S.A.* Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? // *Rem. Sens. Env.* 2001. V. 75. № 2. P. 230–479.
- Virk R., King D.* Comparison of techniques for forest change mapping using Landsat data in Karnataka, India // *Geocar-to Int.* 2006. V. 21. № 4. P. 49–57.

Process Mapping Long-Term Changes in the Forests on the Basis of Their Spectral Responses in Rows of Perennial Remote Sensing Data

E. A. Terekhin

Belgorod State University, Federal and Regional Centre for Aerospace Monitoring of Natural Resources, Belgorod

Based on the analysis of series multi-spectral Landsat TM imagery a method of mapping the long-term changes in the forests has been provided. The basis of the method is necessary to study the dynamics of values of the mid-IR range (1.55–1.75 μm), associated with the changes in the forests. On the example of forests of the Belgorod region has been carried testing of the proposed method for mapping the continuous harvesting cuttings produced in the period from 1986 to 2009.

Keywords: forest stands parameters, remote sensing data, spectral ranges, long-term changes, Belgorod region