

Эмпирическая оценка и картографирование таксационно-биометрических характеристик лесных насаждений по материалам космической съемки LANDSAT TM*

Э.А. Терехин

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга
объектов и природных ресурсов,
308015 Белгород, Победы 85
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

Изложены результаты анализа эмпирических связей между таксационно-биометрическими показателями лесных насаждений (возрастом, высотой и диаметром стволов) и их спектральными отражательными свойствами. Объект исследования – лесные массивы Белгородской области, характеризующиеся преобладанием дуба черешчатого в качестве основной лесообразующей породы. В основе результатов исследования – информация с 1500 лесотаксационных выделов, на которых изучены таксационно-биометрические параметры насаждений и их спектральные свойства. Отражательные свойства насаждений оценены по материалам многозональной космической съемки со спутника LANDSAT TM и выражены коэффициентами спектральной яркости (коэффициентами отражения), либо спектральными вегетационными индексами. Установленные эмпирические связи имеют форму, близкую к линейной. Приведены результаты картографирования таксационных показателей насаждений на основе их спектральных отражательных свойств.

Ключевые слова: таксационно-биометрические показатели лесных насаждений, дистанционное зондирование, спектральные вегетационные индексы, регрессионный анализ.

Введение

Современные подходы к исследованию лесных насаждений подразумевают применение данных многозональной космической съемки для картографирования и оценки состояния лесных массивов. Применение спутниковых методов для решения указанных задач должно основываться на детальном изучении спектрального отклика лесных массивов на космических снимках и влиянии на него характеристик насаждений, к которым относятся в первую очередь таксационно-биометрические показатели (возраст, высота, диаметр стволов). Физической предпосылкой применения данных многозональной космической съемки для оценки характеристик лесных насаждений является зависимость отражательной способности растительных тканей от их строения и состава, которые изменяются по мере роста насаждений. Детальное изучение спектрального отклика предполагает оценку количественных связей между спектром отражения лесного массива и его таксационно-биометрическими параметрами. Спектральные характеристики могут выражаться зональными коэффициентами отражения лесной растительности, т.е. коэффициентами отражения в разных спектральных диапазонах, либо спектральными вегетационными индексами. Применение индексов для анализа отражательной способности природных объектов основано на физическом смысле алгебраических преобразований, выполняемых в ходе расчета индексов, а конкретно – в трансформации спектрального отклика природных объектов, во многих случаях позволяющей более детально исследовать их отражательные свойства.

Количественное описание связей между спектральными характеристиками лесных массивов и их биометрическими параметрами позволит определить возможность оценки

* Работа выполнена по проекту «ГК П743 мероприятия 1.2.1 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.»

возраста, высоты, диаметра стволов на основе их спектра отражения, извлеченного из материалов многозональной спутниковой съемки. Успешный результат исследований в этом направлении позволит выполнить оценку перечисленных лесохозяйственных параметров по данным многозональной съемки, что в свою очередь снизит стоимость и повысит эффективность мониторинга лесного фонда. В ряде работ отечественных (Барталев, 2005, 2007; Данилин, 2007; Черепанов, 2008) и зарубежных авторов (Eklundh, 2001; Gerulo, 2002; Phua, 2003; Lu, 2004; Propastin, 2009) показаны различные способы изучения характеристик лесных фитоценозов по материалам космической съемки. В то же время во многих случаях отмечается значительная региональная особенность разработанных подходов и установленных закономерностей.

Необходимость внедрения дистанционных технологий лесного мониторинга и оценки особенно актуальна для изучения состояния лесопокрытых земель, основу которых составляют насаждения из особо ценных лесных пород, например, дуба черешчатого. Доля дуба среди лесов России составляет не более 5% лесопокрытой площади. В то же время в ряде областей, в том числе в Белгородской области, он является основной лесобразующей породой, занимающей 70% лесопокрытых площадей (Авраменко, 2008).

Исследования по проблеме поиска и обоснования количественных связей между таксационно-биометрическими параметрами лесных насаждений (возрастом, высотой, диаметром стволов, биомассой и др.) и их спектральными отражательными свойствами активно развиваются в настоящее время (Lutz, 2008). В то же время, значительная сложность связана с тем, что далеко не всегда удается установить четкие зависимости и выполнить их количественное описание. Особенностью данного вида исследований является эмпирический характер установленных закономерностей, значительное влияние региональных свойств насаждений на форму рассчитываемых уравнений (Kajisa, 2009) и необходимость привлечения значительного объема данных наземных исследований для получения достоверных результатов.

Настоящее исследование направлено на поиск и установление количественных связей между таксационно-биометрическими характеристиками лесных массивов Белгородской области и значениями спектральных индексов/диапазонов, оцененных по данным космической съемки Landsat TM, наиболее удовлетворяющей для целей анализа спектральных особенностей насаждений на региональном уровне. В работе показана возможность использования спектральных характеристик лесов для картографирования основных таксационно-биометрических показателей: возраста, высоты и диаметра стволов.

Особенности спектрального отклика лесной растительности

Кривая спектрального образа зеленой растительности характеризуется различными коэффициентами отражения в разных зонах спектра (Кринов, 1947; Виноградов, 1984), что предполагает неодинаковую информативность спектральных диапазонов, а, следовательно, и вегетационных индексов для оценки биометрических характеристик насаждений. Под информативностью подразумевается способность спектрального признака реагировать на изменение определенного таксационно-биометрического параметра насаждения в пространстве или во времени. Информативность может оцениваться через тесноту связи между спектральным признаком и параметром древостоя.

Исследование, направленное на выявление спектральных показателей наиболее чувствительных к таксационным параметрам должно предшествовать поиску эмпирических отношений между характеристиками насаждений и их спектральными отражательными свойствами. В противном случае может оказаться, что отрицательный результат по поиску соответствующей

щих связей будет обусловлен не их реальным отсутствием, а применением малоинформативного спектрального индекса или диапазона, характеризующихся слабой связью с показателями насаждений. Предварительная оценка связи между зональными коэффициентами отражения лесной растительности и характеристиками насаждений показала, что наиболее тесная связь характерна для 5-го канала (1,55–1,75 мкм). Коэффициенты корреляции в этом диапазоне достигают 0,72 для возраста, 0,82 для высоты и 0,71 для диаметра стволов насаждений (при уровне значимости 0,05). Анализ информативности спектральных индексов выявил наиболее тесную связь показателей КТ1 – значений первой компоненты спектральных преобразований Каута-Томаса (Crist, 1984) и PC2 – значений второй главной компоненты спутникового изображения (Lu, 2005) с возрастом, высотой и диаметром стволов насаждений. Перечисленные показатели поочередно применяли для выявления количественных связей с параметрами насаждений. В анализе также принимали участие спектральные индексы, теснота связи которых с характеристиками насаждений оказалась несколько ниже чем, зональных коэффициентов отражения 5-го канала и индексов КТ1 и PC2. Это индексы GEMI, КТ2, RDVI, NLI, TM53 (таблица 1). Решение задачи установления искомых связей подразумевает анализ таксационных показателей насаждений для совокупности лесных участков и соответствующих им спектральных характеристик.

Таблица 1. Анализируемые спектральные вегетационные индексы*

Название индекса	Формула расчета
КТ1	$0,304TM1+0,279TM2+0,474TM3+0,559TM4+0,508TM5+0,186TM7$
КТ2	$-0,285TM1-0,244TM2-0,544TM3+0,704TM4+0,084TM5-0,180TM7$
PC2	$-0,079TM1+0,121TM2+0,212TM3+0,787TM4+0,421TM5+0,372TM7$
GEMI	$\mu(1 - 0,25 \times \mu) - (TM3 - 0,125)/(1 - TM3)$, где $\mu = [2(TM42 - TM32) + 1,5 \times TM4 + 0,5 \times TM3] / TM4 + TM3 + 0,5$
RDVI	$(TM4 - TM3) / \sqrt{(TM4 + TM3)}$
NLI	$(TM4^2 - TM3) / (TM4^2 + TM3)$
TM53	$TM5 / TM3$

* TM1–TM7 – зональные коэффициенты отражения Landsat TM.

Описание экспериментальных данных и технологии анализа

Экспериментальными данными являлись материалы наземных обследований, в качестве которых нами предложено использовать результаты комплексных лесоустроительных работ, проводившихся для территории Белгородской области в 1994-1995 гг., а также результаты спектральной обработки снимков. Сбор материалов был осуществлен с группы лесных массивов, выбранных на основании установленных критериев:

1. Лесные массивы должны быть типичными для региона исследования, что необходимо для того, чтобы установленные по ним связи между таксационными показателями насаждений и спектральными свойствами отражали характеристики подавляющего большинства лесов региона.
2. По выбранным лесным массивам можно было собрать репрезентативную выборку таксационных характеристик насаждений, наиболее широко представленных в области. В случае лесов Белгородской области это насаждения со следующими параметрами: основная лесобразующая порода – дуб нагорный высокоствольный (дуб черешчатый), тип лесорастительных условий – дубрава свежая, по эдафической сетке Алексева-Погребняка (Колесниченко, 1981).

3. Лесные массивы должны быть однородны по составу, но разнообразны по возрасту, высоте, диаметру стволов. Выполнение данного условия необходимо для того, чтобы можно было исследовать спектральные характеристики всех классов возрастов, высот и других таксационных показателей лесных насаждений.
4. Выделы лесных массивов должны быть достаточного размера, чтобы пространственное разрешение снимков позволяло оценивать спектральные свойства насаждений в их границах. Исходя из того, что разрешение снимков Landsat TM (которые применяли в качестве данных многозональной спутниковой съемки) составляет 30 м, нами установлено, что размеры выделов для достоверной оценки их спектральных отражательных свойств должны быть не менее 1,5–2 га.
5. На участках снимков, покрывающих исследуемые лесные массивы, должна отсутствовать облачность. Наилучшим вариантом является использование снимков, полностью свободных от облачности или с крайне незначительным ее процентом, т.к. наличие облаков изменяет общий спектральный фон изображения и во многих случаях очень плохо поддается атмосферной коррекции.

Суммарная площадь выбранных лесных массивов составила 6693 га. В общей сложности была обработана информация с 1500 лесотаксационных выделов, в том числе полный набор лесотаксационного описания с 1288 выделов. Обработка лесоустроительной информации заключалась в следующих этапах: сканирование и географическая привязка лесоустроительных планшетов, их оцифровка (перевод в векторный формат), присоединение к ним атрибутивных таблиц и заполнение их данными лесотаксационного описания. Перечисленные этапы обработки данных были выполнены в программах ERDAS IMAGINE 9.1 и ArcGIS 9.3.1. Суммарная статистика обработанных данных приведена в таблице 2. Возраст оценивался в годах, высота – в метрах, диаметр стволов – в сантиметрах.

Таблица 2. Суммарная статистика обработанных данных лесоустройства

Исследовательский участок	Количество таксационных выделов	Параметр насаждения	Мин.	Макс.	Среднее	Ст. откл.
Борисовский	407	возраст	5	130	46	23
		высота	2	26	16	5
		диаметр стволов	2	48	19	8
Шебекинский	625	возраст	5	130	52	24
		высота	2	27	17	6
		диаметр стволов	2	56	21	9
Чернянский	256	возраст	6	120	52	25
		высота	2	27	15	5
		диаметр стволов	2	44	19	8

Для получения достоверных результатов спектральной обработки спутникового изображения, его исходные значения спектральных яркостей (уровни квантования) Digital Numbers (DN) были преобразованы в значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) (Chander, 2003, 2009). Таким образом, были получены растровые изображения каналов снимка в виде значений коэффициентов отражения, которые послужили основой для расчета спектральных вегетационных индексов.

Для получения выборки значений основных лесотаксационных характеристик насаждений: возраста, высоты, диаметра стволов и соответствующих им значений коэффициентов отражения и спектральных индексов, в лесных массивах был размещен набор из 492 круговых исследовательских площадей. Совокупность площадей была развернута автоматически в геоинформационной системе на основании данных лесотаксационного описания

с помощью алгоритма, написанного в программе ArcGIS. Расстановка площадей в выделах осуществлялась по следующим критериям: основная лесообразующая порода – дуб черешчатый, тип условий местности – дубрава свежая, минимальная площадь выдела – 2 га (что обеспечивало достоверное извлечение спектральных характеристик из снимка). В выделе располагалось не более одной оценочной площади. Значения коэффициентов отражения и спектральных индексов, рассчитанные на площадях в совокупности с соответствующими таксационными параметрами насаждений позволили создать репрезентативную выборку для количественной оценки связи между таксационно-биометрическими параметрами насаждений их спектральными свойствами.

Оценка связей характеристик лесных насаждений с их спектральными отражательными свойствами

Анализ статистических связей между данными наземных таксационных обследований насаждений и их спектральными показателями производился на основании выборки значений, полученных со всех исследовательских участков. Выполненный предварительный анализ, направленный на оценку линейности корреляции, показал, что связи между возрастом, высотой, диаметром стволов насаждений и наиболее информативными спектральными показателями (коэффициенты спектральной яркости 5-го канал 1,55–1,75 мкм, индексы КТ1, РС2 и др.) носят линейными характер. Причем линейная зависимость носит обратный характер (таблица 3).

Таблица 3. Уравнения связи спектральных диапазонов/индексов с параметрами лесных насаждений

Таксационный показатель насаждения	Оцениваемый диапазон	Спектральный индекс/диапазон	Уравнение связи
Возраст (А), годы	5-120	КСЯ 5-го канала	$A = 227,9-1373,5 \times TM5$
		КТ1	$A = 7963,7-741,5 \times КТ1$
		РС2	$A = 182,8-429,9 \times РС2$
Высота (Н), м	2-27	КСЯ 5-го канала	$H = 70,8-417,7 \times TM5$
		КТ1	$H = 2236,7-208 \times КТ1$
		РС2	$H = 55-123,5 \times РС2$
Диаметр стволов (D), см	2-56	КСЯ 5-го канала	$D = 93,5-562 \times TM5$
		КТ1	$D = 3166,6-294,76 \times КТ1$
		РС2	$D = 73,7-171,1 \times РС2$

КТ1 – значения первой компоненты спектральных преобразований Каута-Томаса, РС2 – значения второй главной компоненты спутникового изображения Landsat.

График зависимости между значениями возраста насаждений и спектральным индексом КТ1 (рис. 1) дает представление о форме статистического облака значений возраста насаждений и соответствующих показаниях индекса КТ1.

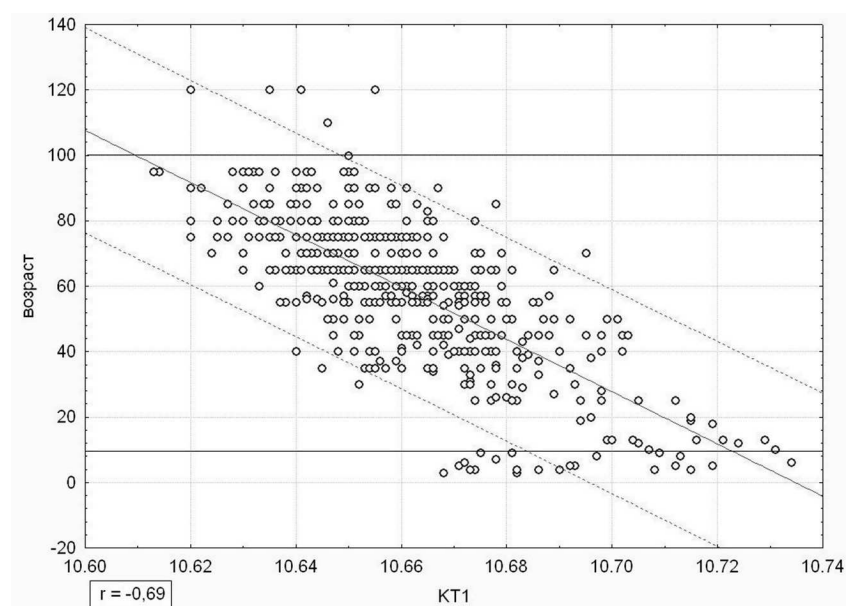


Рис. 1. График зависимости между значениями возраста лесных насаждений и спектральным индексом $KT1$

Из рисунка видно, что между значениями индекса и возрастом насаждения существует четкая обратная зависимость. График показывает, что значения спектрального индекса слишком молодых насаждений (до 10 лет) и очень старых (более 100 лет) выбиваются из общей картины. Спектральные особенности насаждений остальных возрастов в целом соответствуют общему тренду. Аналогичные по форме зависимости установлены между значениями возраста и КСЯ 5-го канала, а также спектрального индекса $PC2$ (табл. 3).

Кроме приведенных выше трех наиболее информативных показателей ($КСЯ$ 5-го канала, $KT1$, $PC2$) была проанализирована группа индексов, обладающих меньшей чувствительностью к параметрам насаждений. Пошаговый регрессионный анализ позволил рассчитать уравнения связи (табл. 4), использующие группу спектральных показателей в качестве независимых переменных. Однако, точность оценки таксационно-биометрических параметров по уравнениям, применяющих группу показателей оказалась не выше предсказательной точности уравнений с одной независимой переменной.

Таблица 4. Уравнения связи между параметрами насаждения и его спектральными показателями, построенные по нескольким независимым переменным с применением линейной модели множественной регрессии

Таксационный показатель насаждения	Анализируемый диапазон	Независимые переменные	Уравнение связи
Возраст (A), годы	5-120	$KT1$, GEMI, $PC2$, $KT2$	$A = 21158,4 - 2101,8 \times KT1 + 1085,7 \times GEMI + 131 \times PC2 - 770,7 \times KT2$
Высота (H), м	2-27	$KT1$, GEMI, $KT2$, $PC2$, RDVI, NLI, TM53	$H = 10853,81 - 1184,88 \times KT1 + 870,59 \times GEMI - 1232,74 \times KT2 + 42 \times PC2 + 1053,82 \times RDVI - 268,63 \times NLI + 292,69 \times ND53 - 34 \times TM53$
Диаметр стволов (D), см	2-56	$KT1$, GEMI, $KT2$, $PC2$, RDVI, NLI, TM53	$D = 17000 - 1869,63 \times KT1 + 1485,26 \times GEMI - 2020,2 \times KT2 + 55,2 \times PC2 + 1629,6 \times RDVI - 455,6 \times NLI + 165,4 \times ND53$

$KT1$ – первая компонента спектральных преобразований Каута-Томаса, $PC2$ – вторая главная компонента спутникового изображения. GEMI – глобальный индекс состояния среды, $KT2$ – вторая компонента спектральных преобразований Каута-Томаса, RDVI, NLI – нормализованные вегетационные индексы, TM53 – зональное отношение 5-го и 3-го каналов Landsat

Кроме того, уравнения, использующие группу спектральных показателей, обладают существенным недостатком – оцененные на их значения возраста, высоты и диаметра стволов насаждений могут выходить за рамки реально допустимых, что не присуще уравнениям с одной независимой переменной при указанном диапазоне значений. Таким образом, уравнения с одним спектральным показателем более эффективны для оценки основных таксационно-биометрических характеристик.

Картографирование характеристик насаждений на основе значений спектральных индексов и диапазонов

Полученные уравнения связи между таксационно-биометрическими параметрами насаждений и их спектральными признаками позволили создать картограммы анализируемых характеристик: возраста, высоты и диаметра стволов насаждений. Картограмма оцененных значений возраста, построенная по значениям индекса КТ1, приведена на рис. 2.



Рис. 2. Прогнозная картограмма возраста лесного насаждения, построенная по значениям индекса КТ1 (Шебекинский участок). 1 – оценочные площади, 2 – сеть кварталов/выделов лесного массива

Аналогичные картограммы возраста, а также карты высот и диаметров стволов лесных насаждений были созданы для остальных (Борисовского и Чернянского) исследовательских полигонов. Картограммы подготовлены по снимкам 1995 г. для сопоставления реальных значений возраста, высоты и диаметра с предсказанными по полученным картограммам. Анализ показал, что для средневозрастных насаждений (20–85 лет) характерно наибольшее соответствие реальных и предсказанных значений, разница между которыми составила от 0 до 7 лет. Большим расхождением характеризуются очень молодые насаждения (до 10–20 лет) и насаждения свыше 80 лет, для которых ошибка точности предсказания достигает 10–14 лет. Высота и диаметр стволов насаждений старше 20 и моложе 85–90 лет предсказываются с точностью 1–2 м и 2–4 см. Соответственно, ошибка оценки высот и диаметров стволов молодых и переспелых насаждений достигает 2–6 м и 5–10 см.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что отдельные спектральные индексы (значения 1-й компоненты спектральных преобразований Каута-Томаса и второй главной компоненты снимка), а также коэффициенты спектральной яркости среднего инфракрасного диапазона (1,55–1,75 мкм) показывают высокий уровень корреляции с основными таксационно-биометрическими параметрами насаждений (возрастом, высотой и диаметром стволов). Установлено, что между группой биометрических параметров насаждений и их спектральными отражательными свойствами существует устойчивая связь. Ее форма близка к линейной. Связь характеризуется обратной зависимостью между таксационно-биометрическими характеристиками насаждений и группой спектральных показателей (индексов и диапазонов). Полученные результаты подтверждены значительным объемом анализируемого материала (1288 таксационных выделов, 492 оценочные площади), включающего результаты лесоустройства и спектральные характеристики насаждений. Сопоставление уравнений, использующих один или несколько спектральных характеристик насаждений в качестве независимых переменных, выявило большую эффективность первых. Показана возможность применения полученных уравнений для картографирования важнейших таксационно-биометрических параметров лесных массивов. Впервые для лесов Белгородской области проведена количественная оценка таксационных характеристик насаждений по их спектральным отражательным свойствам. Предложенный подход может быть применен для картографирования основных лесотаксационных характеристик дубовых насаждений с возрастом до 85–90 лет.

Литература

1. *Авраменко П.М., Акулов П.Г., Анисимов А. И. и др.* Состояние окружающей среды и использование природных ресурсов Белгородской области в 2007 году: справочное пособие; под. ред. С.В. Лукина. – Белгород: Константа, 2008. – 276 с.
2. *Барталев С.А., Беляев А.И., Егоров В.А., Еришов Д.В., Коровин Г.Н., Коршунов Н.А., Котельников Р.В., Лупян Е.А.* Валидация результатов выявления и оценки площадей, поврежденных пожарами лесов по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Т. 2, №2 – С. 343 – 353.
3. *Барталев С.А.* Разработка методов оценки состояния и динамики лесов на основе данных спутниковых наблюдений: автореф. дис. докт. технич. наук – М., Институт косм. исслед. РАН, 2007. – 48 с.
4. *Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. – 321 с.
5. *Данилин И.М.* Морфологическая структура, продуктивность и дистанционные методы таксации древостоев Сибири: автореф. дис. докт. сельхоз. наук. – Красноярск: Институт леса им. Сукачева СО РАН, 2003. – 48 с.
6. *Колесниченко М.В.* Лесомелиорация с основами лесоводства. М.: Колос, 1981. 335.
7. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-го АН СССР, 1947. – 273 с.
8. *Черепанов А.С.* Технология выявления медленных изменений в лесах по мультиспектральным космическим снимкам (на примере вымокания лесов) Черепанов // Геоматика. – 2009. – №3. – С. 66–75.
9. *Chander G., Markham B., Helder D. L.* Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. P. 893–903.
10. *Chander G., Markham B.* Revised landsat-5 tm radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges // Transactions on geosciences and remote sensing. 2003. V. 41. № 11. P. 2674–2677.
11. *Crist E.P., Cicone R.C.* A physically-based transformation of Thematic Mapper data – the TM Tasselled Cap // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1984. V. 22. P. 256–263.

12. *Eklundh L., Harrie L., Kuusk. A* Investigating relationships between Landsat ETM+ sensor data and leaf area index in a boreal conifer forest // *Remote Sensing of Environment*. – 2001. – V. 78, №3. – P. 239-251.
13. *Kajisa T., Murakami T., Mizoue N., Top N., Yoshida S.* Object-based forest biomass estimation using Landsat ETM+ in Kampong Thom Province, Cambodia // *Journal of Forest Research*. V. 14. 2009. P. 203–211.
14. *Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E.* Relationships between forest stand parameters and Landsat TM Spectral responses in the Brazilian Amazon Basin // *Forest Ecology and Management*. – 2004. – V. 198, №1–3. – P. 149–167.
15. *Lutz D.A., Washington-Allen R.A., Shugart H.H.* Remote sensing of boreal forest biophysical and inventory parameters: a review // *Can. J. Remote Sensing*, V.34 №2, 2008. P. 286–313.
16. *Phua M., Saito H.* Estimation of biomass of a mountainous tropical forest using Landsat TM data // *Can. J. Remote Sensing*. – 2003. – V. 29, № 4. – P. 429–440.
17. *Propastin P.* Relations between Landsat ETM+ imagery and forest structure parameters in tropical rainforests: a case study from lore-lindu national park in sulawesi, Indonesia // *EARSeL eProceedings*. – 2009. – V. 8, №2. – P. 96–106.

Empirical estimation and mapping biophysical parameters of forest stand using landsat tm data

E.A. Terekhin

*Belgorod State University,
Federal and Regional Centre for Aerospace Monitoring
of Natural Resources,
308015 Belgorod, Pobedy, 85
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

Results of the analysis of empirical relationships between biophysical parameters of forest stand (age, height and diameter) and their spectral reflective properties are stated. Object of research – forest stands of the Belgorod area with oak as dominant (forest forming) species. Research is spent on the basis of the data collected with 1500 Forest taxation apportionment from which the information is processed and analysed and spectral reflective properties are studied. Reflective properties of stands are estimated based on multispectral satellite imagery from the LANDSAT TM and expressed as coefficients of spectral brightness (reflectance) and spectral indices. Established empirical relationships have a form close to linear. Results of mapping biophysical parameters of forest on the basis of their spectral reflective properties are presented.

Keywords: parameters of forest stands, remote sensing, reflectance, spectral vegetation indices, regression analysis.