

Влияние параметров лесных насаждений на их спектральный отклик (на примере лесов юга Среднерусской возвышенности)

Э. А. Терехин

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

В статье изложены результаты количественной оценки связи между биометрическими параметрами лесных насаждений и их спектральным откликом, измеренным по данным Landsat ETM+ и Landsat OLI. Исследование проведено для широколиственных лесных насаждений, типичных для юга Среднерусской возвышенности. Изучена информативность различных спектральных диапазонов для анализа возраста и высоты лесных насаждений. Установлено, что на их изменение наиболее сильно реагируют коэффициенты спектральной яркости SWIR-диапазона (1,55–1,75 мкм). Повышение возраста лесных массивов приводит к снижению коэффициентов спектральной яркости по логарифмической зависимости. Связь между высотой лесных насаждений и коэффициентами спектральной яркости инфракрасного диапазона может быть описана логистической кривой. Коэффициент корреляции фактических и расчётных значений высот составил более 0,8. С использованием установленной зависимости проведена оценка изменения высоты лесных насаждений на юге Среднерусской возвышенности в период с середины 1980-х по конец 2010-х гг. В исследуемый период установлена тенденция к повышению средней высоты лесных насаждений и снижению её стандартного отклонения. Увеличение высоты, выявленное на основе полученных данных, указывает на повышение среднего возраста лесных насаждений.

Ключевые слова: лесные экосистемы, параметры лесных насаждений, спектрально-отражательные свойства, Landsat, многолетние изменения, лесостепь, Среднерусская возвышенность

Одобрена к печати: 22.10.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-142-154

Введение

Влияние биометрических параметров лесных насаждений на их спектрально-отражательные свойства является теоретической основой использования многозональных спутниковых данных при изучении лесных экосистем. Оценка влияния возраста, высоты и других характеристик древостоя на его спектральный отклик остаётся одной из ключевых задач в аэрокосмических исследованиях лесных земель (Жири́н и др., 2018; Чимитдоржиев и др., 2018). Их изменение — следствие естественного развития лесных насаждений либо воздействия нарушающих факторов, например сплошных лесосечных рубок или пожаров. Количественные данные о связи биометрических и спектральных показателей позволяют проводить анализ изменений в лесах (Социлова, Ершов, 2012; Lutz et al., 2008). Ключевое преимущество спутниковых снимков при этом заключается в одномоментном охвате значительных территорий, на которых фиксируются отражательные признаки. Вследствие этого снимки становятся практически безальтернативным источником информации для оценки ряда характеристик лесных насаждений (Wulder, 1998).

Несмотря на то что данная проблема исследуется не одно десятилетие, во многом она остаётся открытой. Обусловлено это следующими основными причинами. Во-первых, совершенствованием спутниковых съёмочных систем, вследствие которого постоянно растут возможности более глубокого анализа спектрального отклика лесов. Во-вторых, вариабельностью отражательных признаков лесных насаждений на спутниковых изображениях вследствие их региональных особенностей.

Исследования, проведённые в лесах различных природных зон (Gerylo et al., 2002; Li et al., 2011; Lu et al., 2004), позволили установить, что высота деревьев и диаметр стволов оказывают статистически значимое влияние на некоторые спектральные показатели. В то же время использование спектральных признаков для прогнозных оценок характеристик древостоя осложнено локальными особенностями лесов (породным составом и др.) и требует разработки регионально адаптированных моделей (Cohen et al., 2001). Решение соответствующей задачи становится особенно актуальным при изучении многолетних изменений в лесах, для анализа которых разновременные снимки во многом выступают наиболее достоверным источником данных (Мазуров и др., 2017). Оценка возраста и высоты древостоя необходима для моделирования ряда ключевых экологических и лесохозяйственных параметров, например запаса или фитомассы лесных насаждений (Жарко и др., 2018; Deng et al., 2014).

На территории юга Среднерусской возвышенности, охватывающей Белгородскую обл., в последние десятилетия наблюдается тенденция увеличения лесистости (Терехин, Чендев, 2018). Мониторинг состояния лесов, основу которых составляют дубовые насаждения, — ключевая региональная задача (Терехин, 2017). Для получения пространственно-временной картины изменений в лесах необходимо применение разновременных спутниковых данных и объективные представления об особенностях спектрального отклика лесных массивов, типичных для региона.

Цель работы, таким образом, состояла в оценке влияния биометрических параметров лесных насаждений, типичных для юга Среднерусской возвышенности, на их спектральные признаки и в анализе изменений в характеристиках лесных экосистем региона в последние десятилетия: период с середины 1980-х гг. по 2018 г.

Материалы и методика исследования

Территория исследования географически охватывала юг Среднерусской возвышенности и включала Белгородскую обл. (рис. 1, см. с. 144). Объектом исследования выступали лесные массивы, типичные для региона и характеризующиеся преобладанием дуба или в отдельных случаях ясеня в верхних ярусах.

Первый этап исследования включал количественный анализ связи между ключевыми биометрическими параметрами лесных насаждений (возрастом и высотой) и спектрально-отражательными характеристиками. Для анализа была сформирована выборка из нескольких сотен лесных участков (табл. 1), расположенных в лесах региона. Каждый участок представлял собой выдел с известной таксационной информацией, актуальной по состоянию на 2014 г.

Таблица 1. Характеристики лесных участков, изученных для оценки влияния параметров лесных насаждений на их отражательные свойства

Класс возраста	Число лесных участков	Площадь, га	
		общая	средняя
1	33	95,8	2,9
2	45	240,1	5,3
3	32	298,5	9,3
4	51	551,3	10,8
5	64	1313,8	20,5
6	38	879,9	23,2
Всего	263	3379,4	12,8

Для каждого лесного участка в геоинформационной среде была подготовлена векторная основа и сформирован полный набор лесотаксационных параметров и лесорастительных

характеристик, включающий в первую очередь сведения о преобладающей породе, возрасте, высоте, диаметре стволов на высоте 1,3 м, типе леса и типе лесорастительных условий.

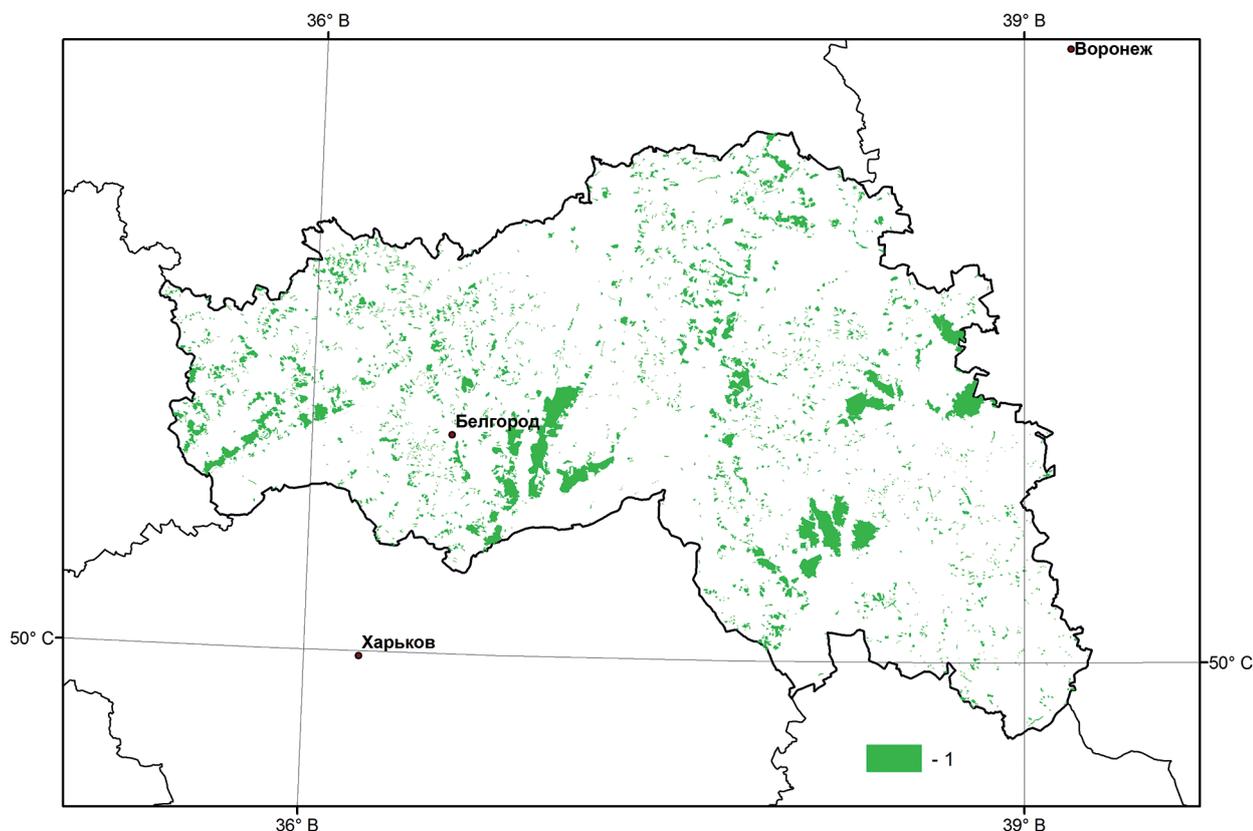


Рис. 1. Исследуемая территория и анализируемые лесные массивы (1)

На следующем шаге выполнен анализ спектрально-отражательных свойств отобранных лесотаксационных выделов. Он был проведён на основе космических снимков Landsat-8 OLI (13.08.2014) и Landsat-7 ETM+ (06.09.2014), полученных в год сбора лесотаксационной информации. Снимки серии Landsat были выбраны для исследования в связи с тем, что среди спутников-сенсоров они характеризуются наиболее длительной историей функционирования и, как следствие, наличием многолетних данных, а также оптимальным сочетанием ряда параметров, которые позволяют исследовать на их основе структуру лесного полога (Курбанов и др., 2014; Hall et al., 2006).

В системе WRS-2 (*англ.* Worldwide Reference System-2), используемой для определения спутниковых сцен Landsat на земной поверхности, изображения имели следующие параметры: Path 177, Row 025. Оба снимка Landsat прошли атмосферную и радиометрическую корректировку. Она состояла в пересчёте исходных значений в коэффициенты спектральной яркости (КСЯ). Анализ КСЯ с близких по параметрам, но разных сенсоров был выполнен для повышения точности всех последующих вычислений, связанных с оценкой многолетних изменений в лесах.

Снимки Landsat-7 ETM+, -8 OLI имеют шесть основных каналов высокого пространственного разрешения (30 м/пиксель). Преимущество этих сенсоров состоит в длительной истории работы, что даёт возможность подбора данных на конкретный год. Изображения Landsat OLI имеют более высокое радиометрическое разрешение — 16 бит. Теоретически это даёт возможность более полного анализа отражательных характеристик лесных насаждений вследствие повышенной чувствительности к ним спектральных показателей, измеренных дистанционно.

На основе снимков Landsat-7, -8 для каждого лесного участка методом зональной статистики был вычислен набор из шести спектральных показателей: коэффициентов спектральной яркости в синем (Blue), зелёном (Green), красном (Red) и трёх инфракрасных каналах (NIR — *англ.* near infrared, ближний инфракрасный; SWIR1 и SWIR2 — *англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный). Таким образом, была сформирована выборка, включающая значения биометрических параметров и соответствующие им значения спектральных показателей. Лесные участки, используемые непосредственно для анализа влияния биометрических параметров на спектрально-отражательные характеристики, отбирали на основе группы критериев: минимальная площадь — 1 га, что обусловлено ограничениями пространственного разрешения исходных снимков; основной элемент верхнего яруса — дуб; тип лесорастительных условий — дубрава свежая.

На основе полученных данных на этапе статистического анализа были изучены:

- теснота связи биометрических параметров лесных насаждений с их спектрально-отражательными признаками;
- значимость различий наиболее информативных спектральных показателей для различных градаций биометрических параметров, например классов возраста;
- количественная оценка связи между биометрическими и спектральными показателями.

Следующий этап включал пространственно-временной анализ спектрально-отражательных и биометрических параметров лесных насаждений в пределах юга Среднерусской возвышенности в период с середины 1980-х гг. по 2018 г. В основу анализа были положены установленные на предыдущем этапе зависимости между параметрами насаждений и их спектральным откликом. Для этой цели была сформирована подборка снимков Landsat 1985–1987, 1999–2001 и 2017–2018 гг. (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). То есть оценку производили для трёх временных срезов, на которые удалось подобрать полное безоблачное покрытие снимками территории исследования (*табл. 2*), включающее разновременные изображения для четырёх спутниковых сцен (Path/Row).

Таблица 2. Характеристики спутниковых снимков, использованных для анализа спектрально-отражательных характеристик лесов юга Среднерусской возвышенности

Path/Row	Сенсор спутника Landsat	Дата получения	Path/Row	Сенсор спутника Landsat	Дата получения
178/025	TM	07.08.1986	177/024	TM	29.08.1985
		13.08.2000		ETM+	22.08.2000
	OLI	31.08.2018		OLI	24.08.2018
177/025	TM	29.08.1985	176/025	TM	28.08.1987
		22.08.2000			10.08.2001
	OLI	24.08.2018		OLI	14.08.2017

При подборке спутниковых данных учитывали, что оптимальный период для оценки состояния лесов по дистанционным данным начинается через одну декаду после полного облиствения и завершается на одну декаду раньше периода массового пожелтения листвы (Харин, Татеиши, 2003). Вместе с этим изображения должны были характеризоваться отсутствием облачности либо её минимальным наличием. Для повышения точности проводимых оценок все снимки стремились отбирать на максимально близкие сроки вегетационного периода. В наибольшей степени перечисленным критериям в регионе соответствовал период августа, на который была выполнена подборка снимков.

Все изображения прошли радиометрическую и атмосферную коррекцию с переводом в безразмерные коэффициенты спектральной яркости. На их основе методом зональной статистики были вычислены коэффициенты спектральной яркости SWIR1-диапазона (1,55–1,75 мкм) для подавляющего большинства широколиственных лесных массивов региона.

Для этой цели был использован созданный ранее (Терехин, 2017) векторный слой всех широколиственных лесов юга Среднерусской возвышенности (см. рис. 1), включающий 2772 лесных массива суммарной площадью 209 002,7 га. С использованием установленных соотношений для каждого лесного массива на основе инфракрасных коэффициентов спектральной яркости осуществили оценку высоты лесных насаждений на все три исследуемых временных среза. Анализ высоты был выполнен в связи с тем, что её динамика отражает ключевые тенденции развития лесных насаждений. Тенденция роста средней высоты одновременно характеризует повышение среднего возраста и невысокую степень нарушенности древостоя, снижение — наоборот.

Результаты и их обсуждение

Оценка влияния возраста лесных насаждений на их отражательные признаки

Оценка тесноты связи между возрастом и спектральными показателями, проведённая на основе коэффициента корреляции Пирсона и непараметрического коэффициента корреляции Спирмена, показала, что наиболее тесно коррелируют с возрастом коэффициенты спектральной яркости диапазонов SWIR1 (1,55–1,75 мкм) и зелёного (Green, 0,52–0,6 мкм). Соответствующая закономерность установлена на основе данных с обоих сенсоров (табл. 3).

Таблица 3. Характеристики тесноты связи между возрастом лесных насаждений и их коэффициентами спектральной яркости в различных диапазонах

Коэффициент корреляции	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
	Landsat ETM+					
Пирсона	-0,36	-0,63	-0,51	-0,46	-0,71	-0,64
Спирмена	-0,37	-0,66	-0,56	-0,44	-0,69	-0,66
Landsat OLI						
Пирсона	-0,30	-0,68	-0,45	-0,47	-0,71	-0,66
Спирмена	-0,32	-0,70	-0,54	-0,44	-0,70	-0,65

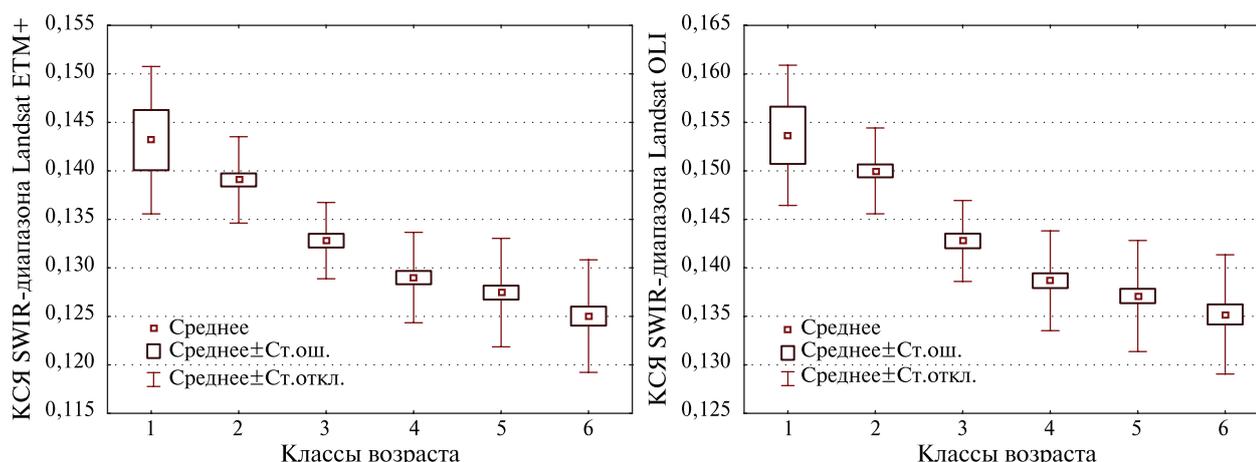


Рис. 2. Значения коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона (1,55–1,75 мкм), соответствующие различным классам возраста лесных насаждений

Сравнение значимости различий между отдельными возрастными категориями (0–20 лет, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 и 100–120 лет) показало, что по значениям SWIR1-диапазона

различается наибольшее число классов возраста лесных насаждений. Соответствующая особенность установлена на основе попарного сравнения КСЯ классов возраста по величине НСР (наименьшей существенной разности). Этот диапазон соответствует каналу 6 сенсора Landsat OLI и каналу 5 сенсора Landsat ETM+.

Различия в величинах КСЯ SWIR1-диапазона для разных классов возраста (интервал 20 лет) наглядно проявляются на графиках их значений (рис. 2, см. с. 146). Таким образом, из проанализированных спектральных показателей эти КСЯ наиболее чувствительны к изменению возраста лесных насаждений.

Регрессионный анализ позволил установить форму зависимости, наиболее полно описывающую связь между возрастом лесных насаждений и коэффициентами спектральной яркости SWIR1-диапазона (табл. 4). Уровень значимости уравнений, представленных в таблице, меньше 0,05.

Таблица 4. Характеристики регрессионных зависимостей, описывающих связь между возрастом насаждений и КСЯ диапазона 1,55–1,75 мкм

Вид зависимости	Уравнение	Коэффициент детерминации R^2
Логарифмическая	$y = -0,011\ln(x) + 0,1864$	0,55
Линейная	$y = -0,0002x + 0,1541$	0,50
Степенная	$y = 0,193x^{-0,07}$	0,53
Экспоненциальная	$y = 0,154e^{-0,001x}$	0,50

Из таблицы видно, что наиболее высокими коэффициентами детерминации характеризуется логарифмическое уравнение. Из графиков (рис. 3) также видно, что оно наиболее полно должно описывать фактическую зависимость коэффициентов спектральной яркости от возраста лесных насаждений. Наименьший разброс значений вокруг регрессионной линии по данным с обоих сенсоров наблюдается для насаждений возрастом 30–40 лет. В обе стороны от этой величины он растёт.

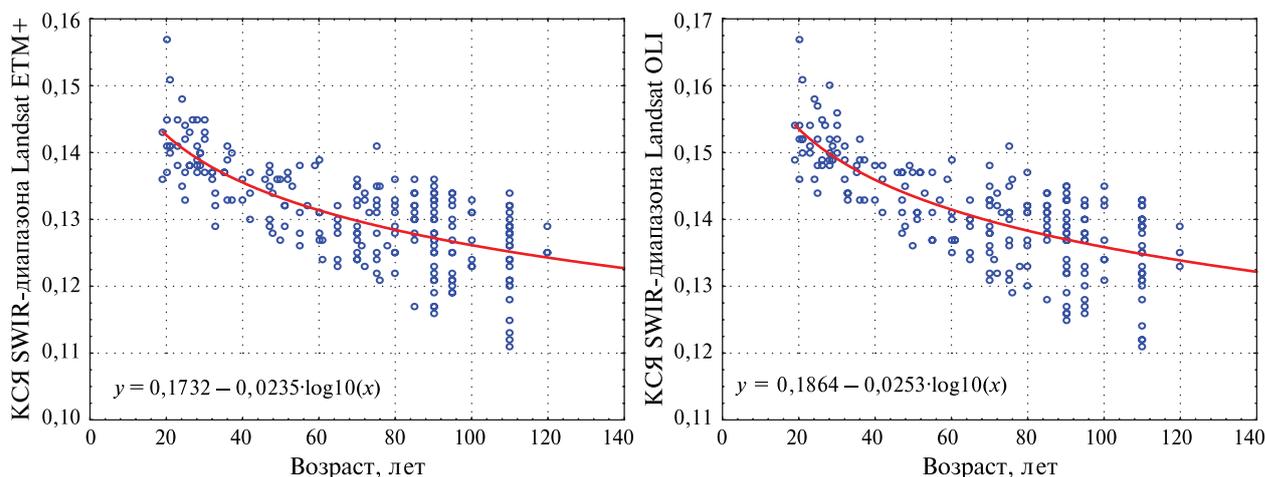


Рис. 3. Зависимость между возрастом лесных насаждений и коэффициентами спектральной яркости SWIR-диапазона (1,55–1,75 мкм)

Повышение стандартного отклонения по мере увеличения класса возраста обуславливается увеличением размеров крон и усложнением их формы для насаждений старше 60 лет, что отражается и на спектральном отклике. Изменения особенностей крон наглядно проявляются при анализе лесных массивов на снимках сверхвысокого пространственного разрешения (Терехин, 2017).

Влияние высоты лесных насаждений на их отражательные признаки

Оценка тесноты связи, проведённая на основе коэффициента корреляции Пирсона и непараметрического коэффициента корреляции Спирмена, показала, что с высотой, так же как и с возрастом, наиболее тесно коррелируют коэффициенты спектральной яркости SWIR1-диапазона (табл. 5). Все коэффициенты значимы на уровне 0,05.

Таблица 5. Характеристики тесноты связи между высотой лесных насаждений и их коэффициентами спектральной яркости в различных диапазонах

Коэффициент корреляции	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
	Landsat ETM+					
Пирсона	-0,34	-0,53	-0,46	-0,44	-0,73	-0,68
Спирмена	-0,42	-0,68	-0,58	-0,43	-0,70	-0,67
Landsat OLI						
Пирсона	-0,27	-0,59	-0,39	-0,47	-0,75	-0,71
Спирмена	-0,34	-0,70	-0,55	-0,42	-0,70	-0,67

При этом теснота их связи с высотой несколько выше, чем с возрастом насаждений. Обусловлено это может быть тем, что высота в большей степени отражает изменения, связанные с биомассой лесных экосистем, чем возраст, и оказывает влияние на спектральные характеристики, в связи с чем её параметры используются для моделирования биомассы лесов (Hall et al., 2006; Lutz et al., 2008).

Регрессионный анализ показал, что наиболее полно связь между высотой лесных насаждений и коэффициентом спектральной яркости может быть описана полиномиальной моделью 3-го порядка (рис. 4). С точки зрения использования величин КСЯ для оценки высоты насаждений выявленная зависимость соответствует логистической функции (сигмоиде), что наглядно видно из графика. И это очень важный момент, так как высота для лесных насаждений имеет предельные значения. Например, дуб в регионе редко встречается выше 28–30 м.

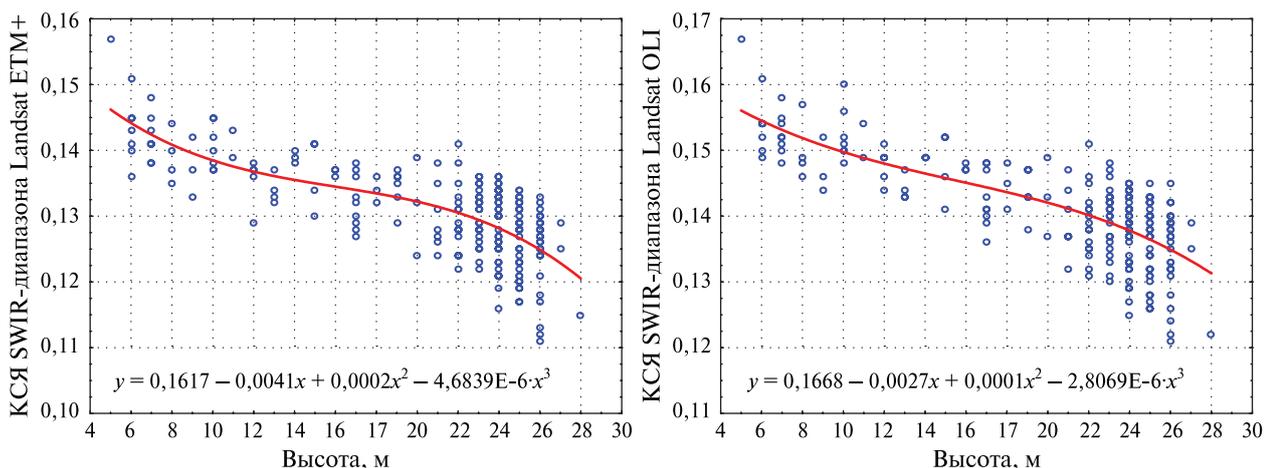


Рис. 4. Зависимость между высотой лесных насаждений и коэффициентами спектральной яркости SWIR-диапазона (1,55–1,75 мкм)

Из графиков зависимости (см. рис. 4) видно, что более высоким значениям высоты лесных насаждений соответствуют более низкие величины коэффициентов спектральной яркости. По достижении высот 26–28 м происходит резкое снижение величин КСЯ.

Соответствующая зависимость наблюдается по данным с обоих сенсоров: Landsat ETM+ и Landsat OLI.

Из полученных данных следует, что для описания обратной зависимости для оценки высоты на основе коэффициентов спектральной яркости инфракрасного диапазона целесообразно использовать убывающую логистическую функцию. В обобщённом виде она имеет следующий вид:

$$y = A + \frac{K - A}{(1 + e^{Bx})^D}, \quad (1)$$

где: y — значения высоты; x — значения коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона (1,55–1,75 мкм); A — верхняя асимптота; K — нижняя асимптота; B — скорость роста; D — переменная, определяющая скорость роста функции у асимптот.

Расчётная зависимость между высотой лесных насаждений и коэффициентами спектральной яркости, измеренными по данным Landsat-8 OLI, имела следующий вид:

$$y = 28 - \frac{27,8}{(1 + e^{-92,3x})^{665276,0}}, \quad (2)$$

где: y — значения высоты; x — значения коэффициентов спектральной яркости SWIR1-диапазона (6-й канал сенсора Landsat OLI).

Зависимость, вычисленная на основе данных Landsat ETM+, имеет такую же форму, но несколько отличные коэффициенты (рис. 5).

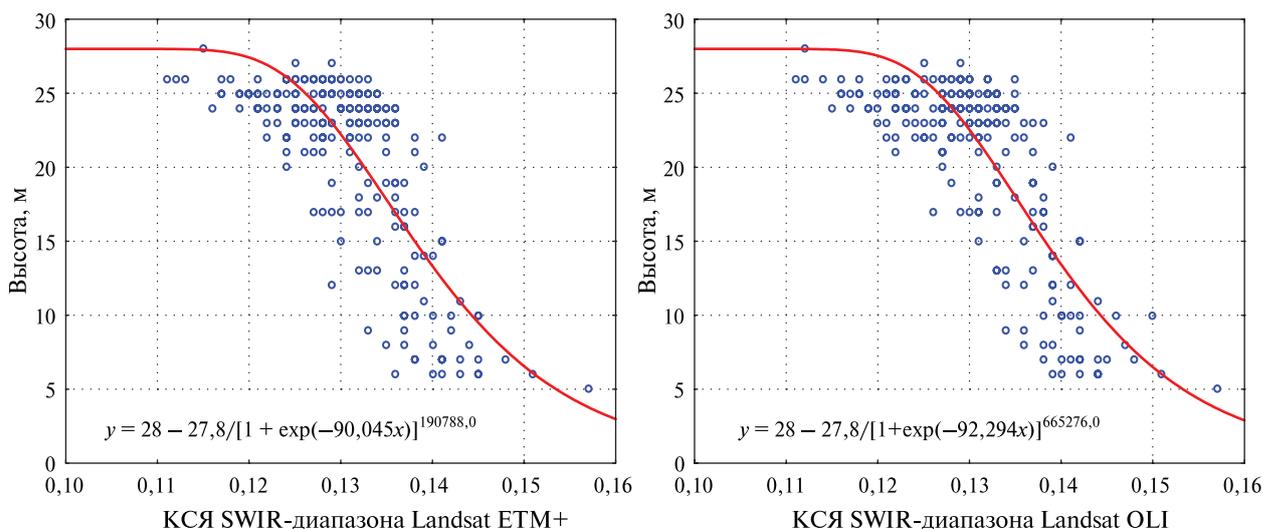


Рис. 5. Расчётная логистическая функция, описывающая динамику КСЯ инфракрасного (SWIR1) диапазона по мере изменения высоты лесных насаждений

При проведении оценок высоты насаждений на основе коэффициентов спектральной яркости на разные временные срезы, охватываемые снимками с конкретного сенсора, целесообразно использовать соответствующий вид уравнения.

Верификация вычисленных зависимостей показала, что коэффициент корреляции фактических и расчётных на их основе значений высоты составил 0,80 по данным Landsat OLI и 0,79 по данным Landsat TM/ETM+ на уровне значимости многим меньше 0,05. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о возможности использования вычисленных зависимостей для оценок высот широколиственных лесных насаждений, типичных для лесостепи Центрального Черноземья.

В то же время высокие разбросы значений вокруг регрессионной кривой являются основным ограничением применения полученных моделей для анализа высот лесных насаждений.

Их оценки, проводимые на основе предложенных уравнений, будут давать определённые погрешности вследствие высокой вариабельности отражательных свойств лесных массивов. Тем не менее уравнения должны позволять выявлять тенденции в лесах при проведении анализов на достаточно далеко отстоящие друг от друга даты, например 10–15 лет, в которые должны произойти существенные изменения в возрасте и высоте лесных насаждений.

С использованием расчётных функций, описывающих связь коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона и высоты лесных насаждений, в пределах Белгородской обл. была осуществлена оценка данного биометрического показателя в разные временные срезы: в середине 1980-х, начале 2000-х и 2017–2018 гг. Она была выполнена для доминирующих в регионе широколиственных лесов. Вычисления производились для каждого листовенного лесного массива из более 2000 единиц, используемых в исследовании. На основе сформированных выборок оценены параметры изменения высоты лесных насаждений на каждый временной срез.

Анализ средней по выборке высоты лесных насаждений показал её положительную динамику в период 1985–2018 гг. (табл. 6). Согласно полученным данным, в это же время наблюдалось снижение разброса значений высоты относительно её средней величины, что видно из существенного снижения коэффициента вариации.

Таблица 6. Изменение высоты широколиственных лесов юга Среднерусской возвышенности в период 1985–2018 гг. на основе данных Landsat

Год	1985	2000	2018
Высота средняя, м	12,8	16,6	20,9
Стандартное отклонение, м	6,2	6,0	5,7
Коэффициент вариации, %	48,4	36,1	27,3

Повышение средней высоты выступает следствием естественного роста насаждений и увеличения их возраста на фоне снижения воздействия негативных факторов, которые могли приводить к нарушениям древостоя. Примером таких факторов являются сплошные лесосечные рубки. Снижение коэффициента вариации высоты и её стандартного отклонения указывает на повышение однородности древесного полога.

Более подробная оценка, проведённая для отдельных категорий высоты лесных насаждений Белгородской обл., показала существенное снижение доли участков с высотой до 6 м и повышение доли насаждений с высотой более 18 м (табл. 7). За диапазоны категорий высот были приняты их интервалы, соответствующие в среднем классам возраста лесных насаждений. Деревья до 6 м соответствуют классу возраста до 20 лет, 6–13 м — 20–40 лет, 13–18 м — 60–80 лет, больше 18 — классу старше 80 лет. Из полученных данных видно, что наибольшее сокращение насаждений высотой до 6 м произошло в период 1985–2000 гг. Соответствующая тенденция, но с меньшей интенсивностью характерна и для периода 2000–2018 гг.

Таблица 7. Изменение соотношения различных категорий высот лесных насаждений на юге Среднерусской возвышенности в 1985–2018 гг. на основе данных Landsat

Высота, м	Доля лесных насаждений, %		
	1985 г.	2000 г.	2018 г.
0–6	10,1	3,2	2,0
6–13	15,2	13,3	5,0
13–18	19,5	22,1	7,3
18–22	19,4	25,2	28,4
22–28	35,7	36,2	57,3

Полученные сведения хорошо согласуются с особенностями изменений лесопользования в регионе в исследуемый период. В середине 1980-х гг. на значительных площадях покрытых лесом земель Белгородской обл. проводились сплошные лесосечные рубки, затрагивающие преимущественно крупнейшие лесные массивы. После их проведения на участках начиналось лесовозобновление и, как следствие, формирование молодых насаждений, средняя высота которых была небольшая. Но в 1991 г. практически все леса были отнесены к 1-й группе, т.е. к категории защитных и водоохранных, что привело к резкому снижению масштабов сплошных рубок и, соответственно, площадей послерубочного лесовозобновления. Следствием изменений в лесопользовании должно было стать сокращение доли лесных насаждений небольшого возраста и высоты.

Тенденция снижения масштабов рубок, доли молодых насаждений (возраст до 20 лет, высота до 6 м) и повышения однородности лесных массивов наглядно наблюдается на разновременных снимках (рис. 6).

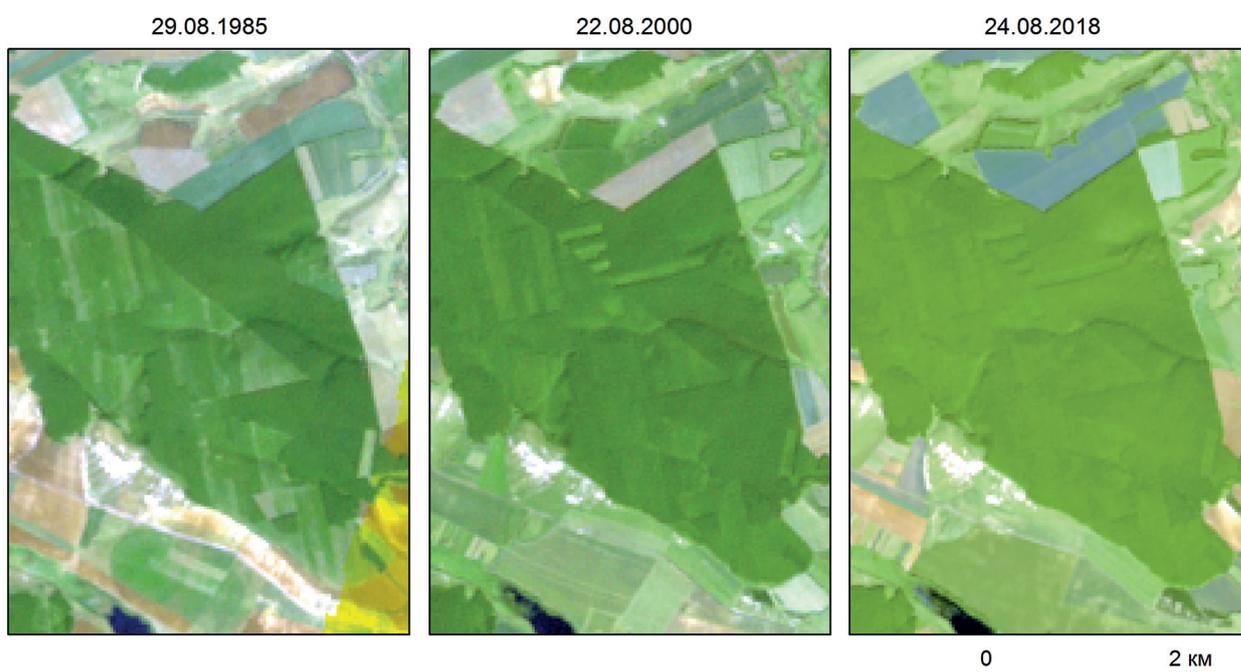


Рис. 6. Пример изменений в структуре покрытых лесом земель юга Среднерусской возвышенности на снимках Landsat в период с середины 1980-х по конец 2010-х гг.

Таким образом, фактические изменения в лесопользовании и анализ космических снимков подтверждают выявленную тенденцию в изменении высоты насаждений, определённую на основе установленных зависимостей. При этом необходимо учитывать и их основные ограничения: оценивать изменения можно, как правило, только за длительные интервалы времени и преимущественно для лесных насаждений, типичных для зоны лесостепи Среднерусской возвышенности, основу которых составляют дубравы.

Выводы

На территории лесостепи юга Среднерусской возвышенности проведён количественный анализ связи между ключевыми биометрическими параметрами лесных насаждений и их спектрально-отражательными признаками. Изучена информативность спектральных диапазонов Landsat ETM+ и Landsat OLI для анализа возраста и высоты широколиственных лесных массивов. Связь между возрастом насаждений и их коэффициентами спектральной яркости

SWIR1-диапазона может быть описана логарифмической зависимостью. Для описания связи между высотой насаждений и этими же коэффициентами спектральной яркости целесообразно использовать логистическую модель. С её применением проведена оценка изменения средней высоты лесных насаждений на территории Белгородской обл. в период с середины 1980-х по конец 2010-х гг. В исследуемый период установлено повышение средней высоты лесных массивов и снижение величины её вариабельности. Выявленные изменения являются признаком увеличения среднего возраста лесных массивов и снижения нарушенности древо-стоя вследствие воздействия негативных факторов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-35-20018.

Литература

1. *Жарко В. О., Барталев С. А., Егоров В. А.* Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы PROBA-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 157–168.
2. *Жиринов В. М., Князева С. В., Эйдлина С. П.* Оценка биометрических параметров насаждений по изображениям межкрупного пространства на космических снимках сверхвысокого разрешения // Лесоведение. 2018. № 3. С. 163–177.
3. *Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Губаев А. В., Лежнин С. А., Полевщикова Ю. А., Демишева Е. Н.* Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat // Вестн. Поволжского гос. технолог. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2014. № 1(21). С. 18–32.
4. *Мазуров Б. Т., Аврунев Е. И., Хамедов В. А.* Оперативный мониторинг лесных земель северных регионов на основе использования оптических и радарных космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 103–111.
5. *Сочилова Е. Н., Еришов Д. В.* Анализ возможности определения запасов древесных пород по спутниковым данным Landsat ETM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 277–282.
6. *Терехин Э. А.* Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 112–124.
7. *Терехин Э. А., Чендев Ю. Г.* Оценка изменения лесистости в современный период на юге Среднерусской возвышенности с использованием материалов разновременных космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 114–126.
8. *Харин Н. Г., Татейшии Р.* Применение снимков NOAA/AVHRR для изучения фенологии лесов России // Лесоведение. 2003. № 2. С. 10–17.
9. *Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Кирбижекова И. И., Шерхоева А. А., Балтухаев А. К., Дагуров П. Н.* Дистанционные оптико-микроволновые измерения параметров леса: современное состояние исследований и экспериментальная оценка возможностей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 9–24
10. *Cohen W. B., Maersperger T. K., Spies T. A., Oetter D. R.* Modelling forest cover attributes as continuous variables in a regional context with Thematic Mapper data // Intern. J. Remote Sensing. 2001. V. 22. No. 12. P. 2279–2310.
11. *Deng S., Katoh M., Guan Q., Li M., Yin N.* Estimating forest aboveground biomass by combining Alos Palsar and Worldview-2 data: a case study at purple mountain national park, Nanjing, China // Remote Sensing. 2014. V. 6. No. 9. P. 7878–7910.
12. *Gerylo G. R., Hall R. J., Franklin S. E., Smith L.* Empirical relations between Landsat TM spectral response and forest stands near Fort Simpson, Northwest Territories, Canada // Canadian J. Remote Sensing. 2002. V. 28. No. 1. P. 68–79.
13. *Hall R. J., Skakun R. S., Arsenault E. J., Case B. S.* Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume // Forest Ecology and Management. 2006. V. 225. No. 1–3. P. 378–390.
14. *Li A., Huang C., Sun G., Goward S. N., Shi H., Toney C., Zhu Z., Rollins M. G., Masek J. G.* Modeling the height of young forests regenerating from recent disturbances in Mississippi using Landsat and ICESAT data // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. No. 8. P. 1837–1849.

15. Lu D., Moran E., Mausel P., Brondízio E. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon basin // *Forest Ecology and Management*. 2004. V. 198. No. 1–3. P. 149–167.
16. Lutz D. A., Washington-Allen R. A., Shugart H. H. Remote sensing of boreal forest biophysical and inventory parameters: a review // *Canadian J. Remote Sensing*. 2008. V. 34. No. 2. P. 286–313.
17. Wulder M. Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters // *Progress in Physical Geography*. 1998. V. 22. No. 4. P. 449–476.

The effect of stand parameters on the spectral response of forests (case study of the south of the Central Russian Upland)

E. A. Terekhin

Belgorod State University, Belgorod 308015, Russia
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

An estimation of the relationship between stand parameters and spectral response of the forest derived from Landsat ETM+ and Landsat OLI data was carried out. The study was conducted for broadleaf forest in the south of the Central Russian Upland. The efficiency of spectral ranges for the analysis of forest stand parameters was studied. The SWIR-range reflectances (1.55–1.75 μm) most strongly correlate with age and height of forest. The increase in forest age causes a decrease in the SWIR reflectances for the logarithmic dependence. The relationship between forests stand height and infrared reflectances is described by a logistic curve. The correlation coefficient between actual and calculated height values is more than 0.8. Using the established dependence, the changes in forest stands height in the south of the Central Russian Upland in the period from the mid-1980s to the end of the 2010s have been estimated. The tendency of increase in the average stand height and decrease in its standard deviation during the study period was established. An increase in average stand height indicates an increase of forest average age.

Keywords: forest, forest stand parameters, spectral response, Landsat, long-term changes, forest-steppe, Central Russian Upland

Accepted: 22.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-142-154

References

1. Zharko V. O., Bartalev S. A., Egorov V. A., Issledovanie vozmozhnostei otsenki zapasov drevesiny v lesakh Primorskogo kraia po dannym sputnikovoi sistemy PROBA-V (Investigation of forest growing stock volume estimation possibilities over Russian Primorsky Krai region using Proba-V satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 157–168.
2. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Eidlina S. P., Otsenka biometricheskikh parametrov nasazhdenii po izobrazheniyam mezhkronovogo prostranstva na kosmicheskikh snimkakh sverkhvysokogo razresheniya (Estimation of Linkages Between Biometric Indexes of Forests and Pattern of Canopy Spaces on Super-high Resolution Satellite Images), *Lesovedenie*, 2018, No. 3, pp. 163–177.
3. Kurbanov E. A., Vorob'ev O. N., Gubaev A. V., Lezhnin S. A., Polevshchikova Yu. A., Demisheva E. N., Chetyre desyatiletiya issledovaniy lesov po snimkam Landsat (Four decades of forest research with the use of Landsat images), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2014, No. 1(21), pp. 18–32.
4. Mazurov B. T., Avrunev E. I., Khamedov V. A., Operativnyi monitoring lesnykh zemel' severnykh regionov na osnove ispol'zovaniya opticheskikh i radarnykh kosmicheskikh snimkov (Operational monitoring of boreal forests using optical and radar satellite imagery), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 103–111.

5. Sochilova E. N., Ershov D. V., Analiz vozmozhnosti opredeleniya zapasov drevesnykh porod po sputnikovym dannym Landsat ETM+ (Possibility analysis of stem volume of forests assessment using Landsat ETM data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 277–282.
6. Terekhin E. A., Otsenka narushennosti lesnykh ekosistem yugo-zapada Srednerusskoi vozvyshennosti s primeneniem materialov kosmicheskikh s"emok (Estimation of forest ecosystems disturbance in the south-west of Central Russian Upland using remote sensing data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 112–124.
7. Terekhin E. A., Chendev Yu. G., Otsenka izmeneniya lesistosti v sovremennyi period na yuge Srednerusskoi vozvyshennosti s ispol'zovaniem materialov raznovremennykh kosmicheskikh s"emok (Estimation of forest cover changes during modern period in the south of the Central Russian Upland using multiyear remote sensing data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 114–126.
8. Kharin N. G., Tateishi R., Primenenie snimkov NOAA/AVHRR dlya izucheniya fenologii lesov Rossii (Application of NOAA/AVHRR images for studies of forest phenology in Russia), *Lesovedenie*, 2003, No. 2, pp. 10–17.
9. Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Kirbizhekova I. I., Sherkhoeva A. A., Baltukhaev A. K., Dagurov P. N., Distantsionnye optiko-mikrovolnovye izmereniya parametrov lesa: sovremennoe sostoyanie issledovaniya i eksperimental'naya otsenka vozmozhnostei (Remote optical-microwave measurements of forest parameters: modern state of research and experimental assessment of potentials), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 9–24.
10. Cohen W. B., Maersperger T. K., Spies T. A., Oetter D. R., Modelling forest cover attributes as continuous variables in a regional context with Thematic Mapper data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2001, Vol. 22, No. 12, pp. 2279–2310.
11. Deng S., Katoh M., Guan Q., Li M., Yin N., Estimating forest aboveground biomass by combining Alos Palsar and Worldview-2 data: a case study at purple mountain national park, Nanjing, China, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, No. 9, pp. 7878–7910.
12. Gerylo G. R., Hall R. J., Franklin S. E., Smith L., Empirical relations between Landsat TM spectral response and forest stands near Fort Simpson, Northwest Territories, Canada, *Canadian J. Remote Sensing*, 2002, Vol. 28, No. 1, pp. 68–79.
13. Hall R. J., Skakun R. S., Arsenault E. J., Case B. S., Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume, *Forest Ecology and Management*, 2006, Vol. 225, No. 1–3, pp. 378–390.
14. Li A., Huang C., Sun G., Goward S. N., Shi H., Toney C., Zhu Z., Rollins M. G., Masek J. G., Modeling the height of young forests regenerating from recent disturbances in Mississippi using Landsat and ICESAT data, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, No. 8, pp. 1837–1849.
15. Lu D., Moran E., Mausel P., Brondizio E., Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon basin, *Forest Ecology and Management*, 2004, Vol. 198, No. 1–3, pp. 149–167.
16. Lutz D. A., Washington-Allen R. A., Shugart H. H., Remote sensing of boreal forest biophysical and inventory parameters: a review, *Canadian J. Remote Sensing*, 2008, Vol. 34, No. 2, pp. 286–313.
17. Wulder M., Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters, *Progress in Physical Geography*, 1998, Vol. 22, No. 4, pp. 449–476.