



УДК 528.85

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ СПЕКТРАЛЬНЫМИ ОТРАЖАТЕЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ И ИХ ЛЕСОТАКСАЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ¹

Э. А. Терехин

Белгородский
государственный
университет,
Россия, 308015, г. Белгород,
ул. Победы, 85

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Изложены результаты исследования связи между лесотаксационными параметрами лесных насаждений Белгородской области (породным составом, возрастом, высотой) и их спектральными отражательными свойствами, оцененными по снимкам Landsat TM. Установлены сильные корреляционные связи между лесотаксационными параметрами и спектральным индексом КТ1.

Ключевые слова: лесотаксационные параметры лесного насаждения, космические снимки Landsat TM, вегетационные индексы, регрессионный и дисперсионный анализы.

Введение (теоретический анализ)

Использование аэрокосмических данных дистанционного зондирования (ДДЗ) является важнейшим компонентом повышения эффективности мониторинга лесных земель, в котором можно выделить несколько направлений: оценка лесных площадей и их динамики, мониторинг лесных пожаров, дешифрирование типов лесов, исследования лесоинвентаризационных и биофизических параметров древостоя [5], оценка которых занимает одно из ключевых мест среди перечисленных направлений [12]. Современные исследования в этой области направлены на установление эмпирических связей между конкретным лесоинвентаризационным параметром и особенностями спектрального отклика лесного массива, который оценивается по космическому снимку. Исследования такого вида зависимостей ведутся в умеренных, бореальных и тропических лесах [8, 10, 14]. Решение этой задачи напрямую связано с исходными характеристиками самой космической съемки (пространственное, спектральное, радиометрическое разрешение и количество каналов) и с уровнем тематической обработки спутниковых данных, позволяющей оценить спектральные признаки лесной растительности. Анализ зарубежных и отечественных источников показал, что установить функциональные связи или близкие к ним по точности корреляционные отношения между спектральной отражательной способностью насаждений и их таксационными или биофизическими показателями, как правило, не представляется возможным [6,7]. Однако, в ряде работ получены связи с высоким коэффициентом корреляции, позволяющие построить прогнозные картограммы распределения того или иного лесоинвентаризационного параметра [9,11] и дать предварительную оценку распределения некоторых таксационных или биофизических характеристик лесного полога. Фактором, ограничивающим использование практически всех полученных эмпирических моделей, являются региональные особенности насаждений и, как следствие, их спектральные отражательные свойства. Таким образом, для мониторинга лесоинвентаризационных параметров лесов необходимы региональные исследования, позволяющие построить соответствующие прогнозные модели.

Цель нашего исследования заключалась в региональной оценке спектральных свойств лесных насаждений, типичных для Белгородской области и оценка возможности построения по ним прогнозных моделей лесотаксационных показателей, составляющих основу описания лесного массива.

¹ Работа выполнена по проекту «Проведение поисковых НИР по направлению «География и гидрология суши» мероприятия 1.2.1 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.» (№ П743).



Объекты исследования

Правильный выбор объектов исследования – одно из главных условий получения информации, отражающей региональные спектральные особенности лесной растительности. При подборе объектов исследования мы руководствовались тем, что участки леса должны быть типичными для Белгородской области по комплексу показателей, в лесах должны быть в достаточной мере представлены группы деревьев, различные по породному составу, возрасту и другим лесохозяйственным характеристикам. В то же время стоит отметить, что получение информации, полноценно характеризующей спектральные отражательные свойства лесов региона, возможно только путем их анализа в группе лесных массивов, расположенных в разных частях области. Еще один важный момент заключается в том, что желательно исследовать спектральные характеристики параллельно на двух лесных массивах:

В первом – леса находятся под воздействием активной хозяйственной деятельности.

Во втором – развитие древостоев происходит в условиях с минимальной антропогенной нагрузкой, т.е. в условиях, максимально приближенным к естественным.

При этом тип лесорастительных условий в обоих случаях должен быть полностью аналогичен.

На основании этих критериев выбрали два лесных массива, расположенных в юго-западной части Белгородской области, составляющих в прошлом единый лесной массив и находящихся в непосредственной близости друг от друга. Расположение лесных массивов показано на рис. 1.

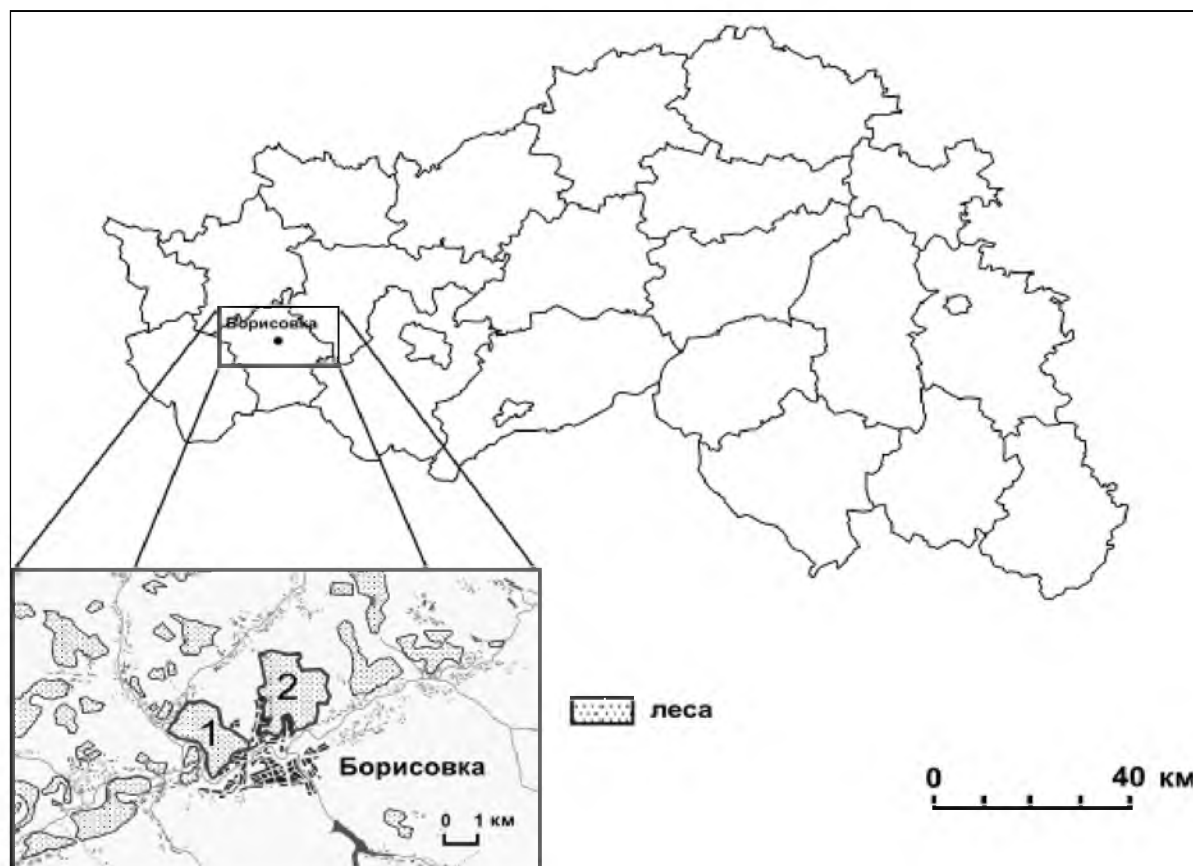


Рис. 1. Расположение объектов исследования на территории Белгородской области:
1 – «Лес на Ворскле», 2 – «Мелкий лес»

Это заповедный участок «Лес на Ворскле», относящееся к заповеднику «Белогорье» площадью 1038 га и урочище «Мелкий лес», площадью 1763 га. Развитие лес-

ных массивов происходило по разным сценариям. Лес на Ворскле с XVII века является охраняемой территорией, на которой сохранились дубравы с возрастом 310-320 лет [2]. Следует отметить, что в «Лесу на Ворскле» сохранились единственные на Европейской территории России дубравы с возрастом более 300 лет. Урочище «Мелкий лес» активно использовалось в хозяйственной деятельности. В нем периодически велись рубки главного пользования, что нашло существенное отражение в современных особенностях состава, возраста и других лесотаксационных параметрах этого лесного массива. Последние участки леса с возрастом 100-120 лет здесь были вырублены в течение последних 15 лет. Оба лесных массива во многом аналогичны друг другу по типу лесорастительных условий и типу лесного участка (по классификации Алексева–Погребняка), но существенно различны по типам насаждения.

Территория исследования характерна для подзоны южной лесостепи, расположенной на юго-западном пологом скате Среднерусской возвышенности. Среднегодовая температура 6 °С, абсолютный максимум 40 °С, абсолютный минимум –37 °С. Средняя относительная влажность воздуха около 75 %. Среднегодовая сумма осадков 537 мм.

Методы исследования

Для реализации поставленной задачи использовали следующие группы методов:

- 1) обработку ДДЗ, включающую их предварительную коррекцию и тематический анализ, заключающийся в оценке спектральных признаков;
- 2) методы геоинформационного анализа;
- 3) статистический анализ данных.

Схема исследования представлена на рис. 2

Блок ДДЗ. При исследовании того или иного лесоинвентаризационного параметра необходимо провести предварительную оценку возможности его оценки дистанционными методами. Т.к. большинство способов аэрокосмического дистанционного зондирования, за исключением лидарных и радиолокационных, методов способны оценивать только спектральные особенности верхней части лесного полога то, необходимо выбрать те лесоинвентаризационные параметры, которые могут влиять на спектральные особенности этой части насаждения.

Анализ отечественных и зарубежных источников [4, 12] показал, что состав, основная порода, возраст, группа возраста и тип леса в отдельных случаях могут быть достаточно успешно оценены дистанционными методами в зависимости от особенностей самого лесного массива и характеристик используемых ДДЗ. Учитывая, что между самими лесоинвентаризационными показателями существуют количественные взаимосвязи, например, между диаметром и высотой, диаметром и возрастом [1, 4], то оценив с помощью дистанционных методов одни параметры, можно сделать прогнозные оценки других. Таким образом, дистанционные методы должны обеспечивать оценку большинства лесоинвентаризационных параметров. Здесь основными ограничивающими факторами являются начальные характеристики используемых аэрокосмических данных и глубина их тематической обработки.

Для адекватной оценки связи таксационных параметров лесных насаждений с их спектральными характеристиками по аэрокосмическим ДДЗ нами установлены следующие требования к используемым материалам космической съемки:

- 1) спутниковые данные должны быть получены в сроки максимально близкие ко времени проведения оценки лесотаксационных параметров;
- 2) снимки должны быть получены в течение вегетационного периода;
- 3) космические снимки должны обладать соответствующим пространственным разрешением, позволяющим визуально дешифровать наиболее сильные контрасты в лесном массиве, иметь каналы, позволяющие дешифровать особенности растительного покрова. На участках снимков, покрывающих объекты исследования должна отсутствовать облачность.

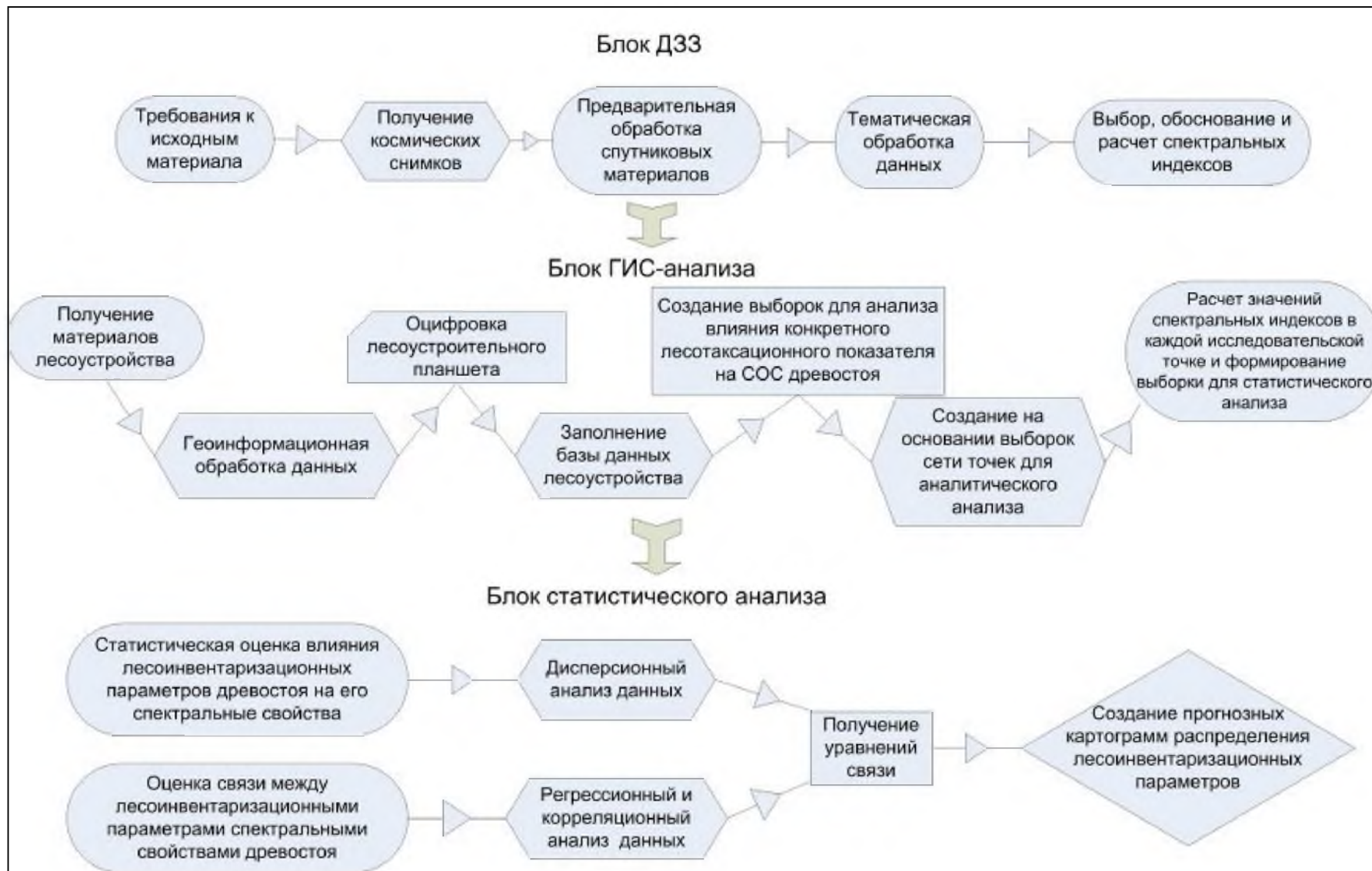


Рис. 2. Схема анализа влияния лесотаксационных параметров насаждения на его спектральные отражательные характеристики.



На основании приведенных критериев для оценки спектрального отклика лесной растительности использовали материалы космической съемки со спутников *Landsat TM*. Применили данные, полученные непосредственно на год лесоустройства. Использовали космические снимки *Landsat* из зоны 177025, т.е. из 177 колонки, 25 ряда глобального покрытия этих снимков. Учитывая сроки проведения лесоустройства в обоих объектах исследования, для «Леса на Ворскле» подобрали снимок 1986 г., а для «Мелкого леса» – 1995 г. Спутниковые данные получили из архива Национальной геологической службы *USGS – GloVis* [13].

Главный этап обработки космических данных заключался в их спектральном анализе, наиболее распространенной категорией которого является расчет спектральных (вегетационных) индексов. Индексы заключаются в алгебраических преобразованиях каналов снимка. Их расчет направлен на выявление различий, которые не обнаруживаются на исходных изображениях. Все индексы являются безразмерными показателями.

Вегетационные индексы можно разделить на группы по способу их расчета: простые отношения, нормализованные индексы, комплексные вегетационные индексы и линейные трансформации изображения [11].

В нашем исследовании мы использовали серию вегетационных индексов в качестве спектральных характеристик лесных объектов. Стоит отметить, что перед тем, как использовать конкретный индекс для оценки параметров лесного насаждения необходимо провести предварительное исследование, направленное на выявление наиболее информативных индексов для оценки параметров лесного насаждения. Руководствуясь зарубежными и отечественными работами в этой области, мы отобрали группу индексов для анализа их связи с параметрами лесного насаждения.

Использованные вегетационные индексы показаны в табл. 1.

Таблица 1

Вегетационные индексы, используемые в исследовании

Индекс	Формула расчета на основе каналов спутника Landsat TM
SR _{4,3}	TM4/TM3
SR _{5,4}	TM5/TM4
NDVI	(TM4-TM3)/(TM4+TM3)
KT1	0.290TM1+0.249TM2+0.480TM3+0.557TM4+0.444TM5+0.170TM7
KT2	0.273TM1+0.217TM2+0.550TM3+0.722TM4+0.073TM5+0.165TM7

Все этапы исследования, связанные с обработкой ДДЗ, выполнили в программном комплексе *ERDAS IMAGINE 9.1*. В результате подготовили картограммы вегетационных индексов на территорию обоих лесных массивов.

Блок ГИС. Данные о лесотаксационных параметрах массива «Мелкий лес» использовали из материалов последнего лесоустройства Белгородской области, которое проводилось в 1994 году [3]. Последнее лесоустройство заповедного участка «Лес на Ворскле» было выполнено в 1986 году.

Для решения поставленной задачи, т.е. достоверной оценки влияния таксационного параметра лесного насаждения на его спектральные свойства, необходимо исключить влияние посторонних факторов. Например, если проводится оценка влияния возраста насаждения на его спектральные характеристики, то необходимо произвести такую выборку участков леса, чтобы в них присутствовали насаждения, разные по возрасту, но аналогичные по составу и типу лесорастительных условий. Для этой цели необходимо произвести выборку с заданными критериями по данным лесоустройства. На основании ее развернуть на местности сеть исследовательских точек с известными параметрами насаждений и рассчитать в каждой точке сети спектральный показатель. В результате будет создана совокупность точек с известными параметрами насаждения и спектральными индексами.

Решить эту задачу можно, изучив материалы последнего лесоустройства, создав на основании них базу данных по таксационному описанию кварталов и выделов лесных массивов. Для этой цели использовали лесоустроительные планшеты с таксаци-



онным описанием каждого выдела. Планшеты отсканировали и привязали к космическому снимку в той же системе координат (проекция *UTM*, зона 37, датум *WGS-84*), затем перевели в векторную форму и присоединили к ним базу данных таксационного описания. База данных, созданная по материалам лесоустройства, включала информацию о полном лесотаксационном описании 443 выделов для массива «Мелкий лес» и 285 выделов для заповедника «Лес на Ворскле». Всего, таким образом, в анализе использовали информацию с 728 выделов.

Следующий шаг связан с созданием выборки из выделов для оценки связи конкретного лесотаксационного параметра со спектральными характеристиками древостоя. После того, как выборка будет готова, на каждом из ее выделов следует расположить точку в виде оценочной площади для извлечения в ней спектральных характеристик древостоя. Адекватное размещение точек является одним из ключевых шагов для получения достоверных результатов, поэтому мы располагали площади на, космическом снимке, исходя из разработанных нами требований.

1. Размер исследовательской площади должен устанавливаться, исходя из пространственного разрешения снимка, и составлять не менее 2-х пикселей изображения. Т.к. пространственное разрешение снимков *Landsat* составляет 30 м, то размер площади должен быть не менее чем 60 м.

2. Точки-площади должны размещаться на характерном однородном участке выдела, надежно различаемом на космическом снимке и не должны выходить за границы выдела.

3. Форма всех площадей должна быть одинакова. Мы применяли круговую форму.

4. Количество точек должно быть репрезентативно для статистического анализа, извлеченных из них характеристик насаждения. Т.к. минимальная выборка, позволяющая установить определенные закономерности, равна 30, то исходить надо из этого количества точек для анализа каждого исследуемого лесоинвентаризационного показателя.

Следуя указанным критериям, на территории лесных массивов разместили сеть исследовательских площадей для оценки влияния возраста, высоты и состава насаждения на его спектральные характеристики. Для автоматической расстановки точек оценки в программе *ArcGIS* разработали модели, позволяющие расположить точки для каждой выборки. В таблице 2 приведены параметры выборок для анализа влияния каждого из параметров на спектральные свойства древостоя.

Таблица 2

Характеристики выборок из лесных выделов для развертывания сети оценочных точек

Лесотаксационный параметр	Особенности исследовательской выборки лесных выделов	Количество точек оценки
Состав	Одновозрастные разносоставные выделы в аналогичных типах лесорастительных условий	69
Возраст	Разновозрастные выделы в схожих лесорастительных условиях с дубом высокоствольным в качестве породы, доминирующей в составе древостоя. Площадь выделов более 2 га	111
Высота	Выделы в аналогичных лесорастительных условиях с дубом высокоствольным в качестве преобладающей породы	83

Размещение сети точек оценки на территории лесных массивов «Мелкий Лес» и «Лес на Ворскле» для анализа влияния возраста и состава насаждений на их спектральные отражательные свойства показано на рис. 3.

На следующем этапе по картограммам вегетационных индексов рассчитали их средние значения в каждой исследовательской площади. Все этапы геоинформационной обработки данных и их анализа выполнили в программе *ArcGIS 9.3*.

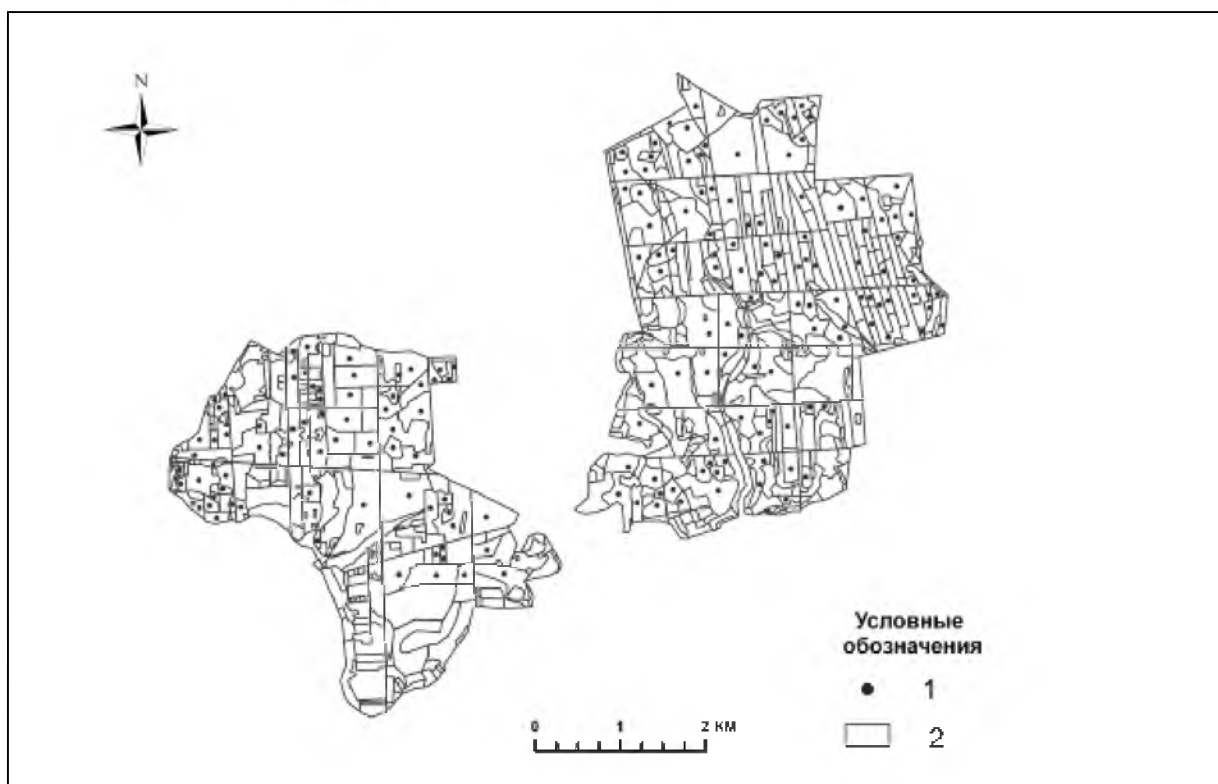


Рис. 3. Размещение сети точек оценки на территории лесных массивов «Мелкий Лес» и «Лес на Ворскле». 1-Исследовательские площади для оценки влияния возраста (для «Мелкого леса» и состава (для «Леса на Ворскле») насаждений. 2-таксационные выделы лесных массивов

Блок статистического анализа заключался в сопоставлении значений лесотаксационных параметров в каждой точке исследовательской сети с показаниями вегетационных индексов в этих же точках. Статистический анализ состоял из двух частей: оценке связи между лесотаксационными параметрами и спектральными индексами и оценке влияния таксационных параметров на спектральные свойства. Первая задача решалась методами регрессионного и корреляционного анализов, вторая – методами дисперсионного анализа. Все стадии статистической обработки данных выполнили в пакете *STATISTICA 6.0*.

Результаты и их обсуждение

Из используемых нами в исследовании пяти вегетационных индексов только один – KT_1 (первая компонента спектрального преобразования Каута-Томаса) показал высокую чувствительность к спектральным различиям в возрасте и высоте насаждения для массива «Мелкий Лес» и чувствительность к различиям в породном составе для заповедного участка «Лес на Ворскле». Остальные индексы – $SR_{4,3}$, $SR_{5,4}$, $NDVI$, KT_2 не выявили никаких закономерностей в изменении спектральных свойств насаждений по мере изменения его возраста, состава или высоты.

Результаты регрессионного и корреляционного анализов, т.е. оценки степени связей лесотаксационных характеристик и спектральных свойств для «Мелкого леса», показали относительно высокие отрицательные коэффициенты линейной корреляции между возрастом и индексом KT_1 , а также между KT_1 и высотой. Графики, характеризующие тренды изменений вместе с уравнениями регрессии и коэффициентами корреляции r изображены на рисунках 4 и 5.

Из обоих графиков видно, что значения спектрального индекса снижаются по мере увеличения возраста и высоты древостоя. Связь в обоих случаях имеет вид, близкий к линейному и характеризуется высокими отрицательными коэффициентами корреляции.

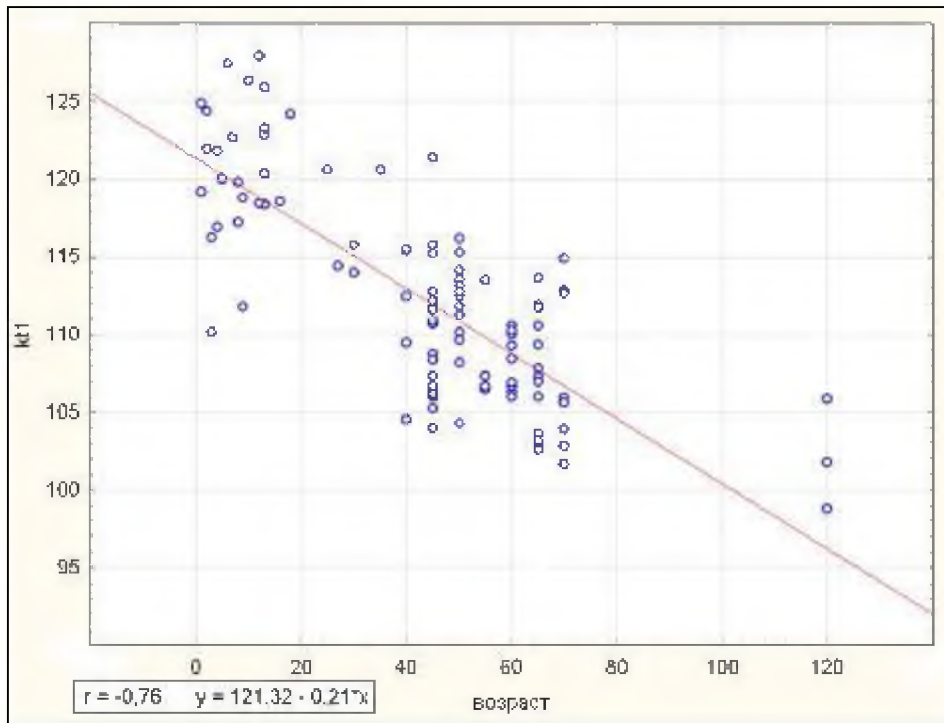


Рис. 4. Связь между возрастом древостоя и индексом КТ1

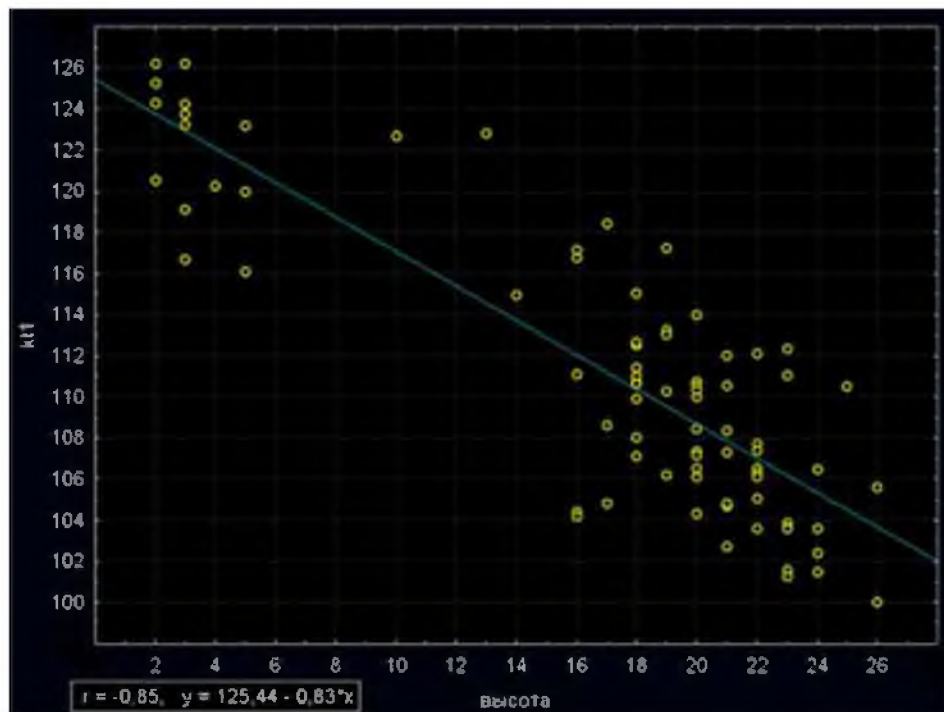


Рис. 5. Связь между высотой древостоя и индексом КТ1

В случае связи между возрастом и индексом КТ1 коэффициент корреляции равен -0.76 , а в случае связи индекса и высоты он составляет -0.85 . Для территории «Леса на Ворскле» аналогичных связей мы не обнаружили. На наш взгляд это можно объяснить наличием на территории этого лесного массива в подавляющем большинстве древостоев с возрастом более 60-70 лет. Для деревьев старше этого возраста различия в спектральных отражательных свойствах, как правило, не выявляются.

Результаты оценки влияния состава, возраста и высоты древостоев на их спектральные свойства, характеризующиеся в нашем случае индексом КТ1, показаны на рисунках 6, 7, 8.

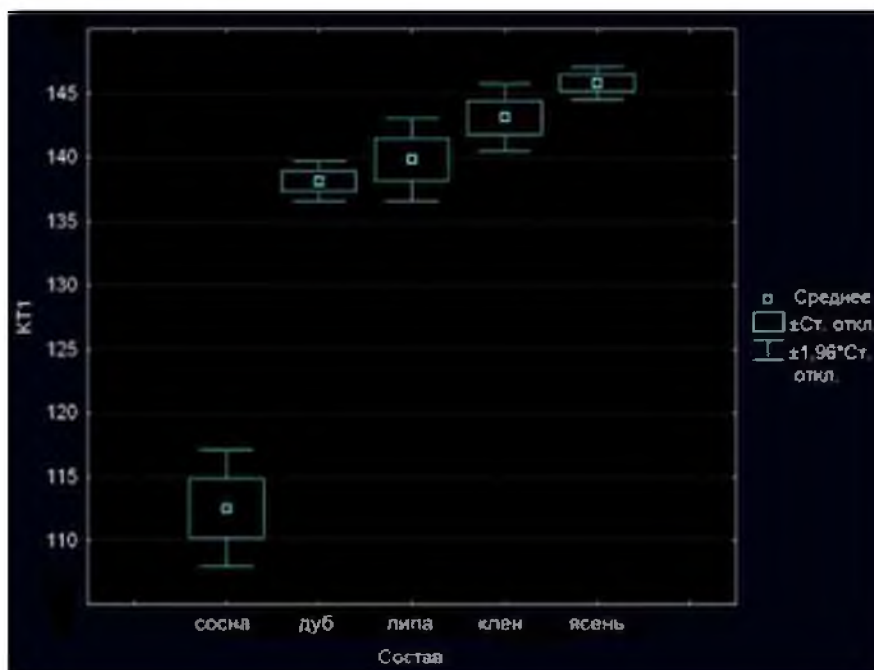


Рис. 6. Влияние состава насаждения на его отражательную способность



Рис. 7. Влияние возраста насаждения на его отражательную способность

Различные по породному составу насаждения, представленные в «Лесу на Ворскле», по мере увеличения значений индекса располагаются в следующий ряд: сосновые, дубовые, липовые, кленовые, ясеневые. При этом спектральные отражательные свойства разных пород деревьев отличаются существенно. Наиболее сильно отличаются от других пород по индексу КТ1 сосновые древостои, характеризующиеся наименьшими значениями индекса. С учетом величины стандартного отклонения между собой перекрываются только значения индекса для дуба и липы.

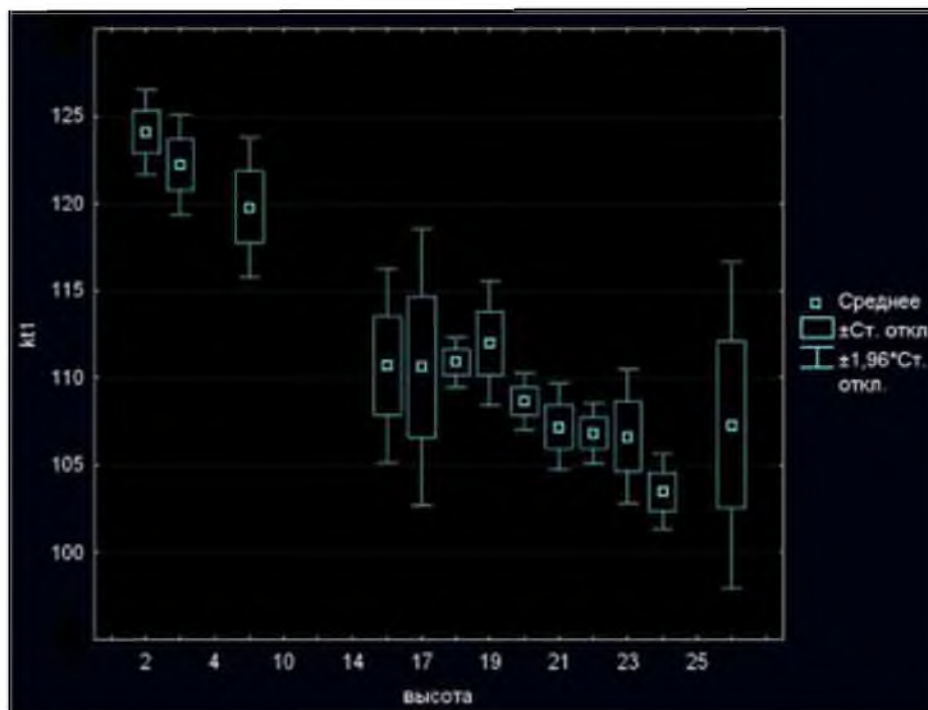


Рис. 8. Влияние высоты насаждения на его отражательную способность

Влияние возраста и высоты насаждений на значения индекса выражено не столь однозначно. Насаждения молодого возраста существенно отличаются по средним значениям индекса от насаждений старше 45 лет. Однако для разновозрастных насаждений в диапазоне 1-12 лет характерно существенное варьирование спектральных свойств. После 30 лет наблюдается резкое снижение значений индекса с определенной степенью варьирования.

Анализируя влияние высоты на значения спектрального индекса, следует отметить, что по значениям индекса между собой наиболее четко различаются насаждения до 10 м и более 10 м.

Выводы

1. Для лесного массива «Мелкий лес», характеризующегося значительной внутренней неоднородностью по высоте и возрасту лесных насаждений, установлена линейная корреляционная связь (коэффициент корреляции 0.76) между возрастом насаждения и индексом KI_1 , и аналогичная связь этого же индекса с высотой насаждения (коэффициент корреляции 0.85). Уравнения связи индекса KI_1 с возрастом и высотой древостоя выглядят следующим образом: $KI_1 = 121.32 - 0.21 \cdot A$ и $KI_1 = 125.44 - 0.83 \cdot H$, где A – возраст, H – высота. Достоверной корреляционной связи параметров насаждения с другими спектральными индексами не обнаружено.

2. Для заповедного участка «Лес на Ворскле» установлено влияние состава насаждения на индекс KI_1 . Влияние состава на остальные индексы не обнаружено. Насаждения, по мере увеличения спектрального индекса, располагаются в следующий ряд по доминирующим породам: сосна, дуб, липа, клен, ясень. При этом сосна наиболее сильно отличается от остальных пород по этому показателю. Хотя различия средних значений остальных пород также значимы, за исключением пары дуб–липа. Достоверных связей возраста и высоты со спектральными индексами для «Леса на Ворскле» не обнаружено. Это, на наш взгляд, может быть обусловлено преобладанием насаждений с возрастом более 60-70 лет, для которых характерна однородность спектральных отражательных свойств.

3. Из используемых спектральных индексов только первая компонента спектральных преобразований Каута-Томаса (KI_1) оказалась чувствительна к различиям в составе, высоте и возрасте насаждения. Остальные индексы оказались не информативны для исследования перечисленных параметров лесного насаждения.



Список литературы

1. Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. – М.: Наука, 1984. – 321 с.
2. Горышина Т.К., Тимофеева Е.К. Заповедник «Лес-на-Ворскле». Заповедники СССР. II. Заповедники Европейской части РСФСР. – М.: Мысль, 1989. – С. 138-151.
3. Состояние окружающей среды и использование природных ресурсов Белгородской области в 2007 году: справочное пособие / П.М. Авраменко, П.Г. Акулов, А. И. Анисимов и др. / Под. ред. С.В. Лукина. – Белгород: КОНСТАНТА, 2008. – 276 с.
4. Сухих В.И., Гусев Н.Н., Данюлис Е.П. Аэрометоды в лесоустройстве. – М.: Лесная промышленность, 1977. – 192 с.
5. Boyd D.S., Danson F.M. Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development // Progress in Physical Geography. – 2005. – Vol. 29, № 1. – P. 1-26.
6. Chen W., Zhao X. Estimation of forest parameters based on TM imagery and statistical analysis // Journal of Forestry Research. – 2007. – № 18. – P. 241-244.
7. Eklundh L., Hall K., Eriksson H., Ardo J., Pilesjö P. Investigating the use of Landsat thematic mapper data for estimation of forest Leaf area index in southern Sweden // Can. J. Remote Sensing. – 2003. – Vol., 29 № 3. – P. 349-362.
8. 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 // Can. J. Remote Sensing. – 2002. – Vol. 28, № 1. – P. 68-79.
9. Estimation of stand volumes using the k-nearest neighbors method in Kyushu, Japan / T. Kajisa, T. Murakami, N. Mizoue, F. Kitahara, S. Yoshida // Journal Forest Research. – 2008. – № 13. – P. 249-254.
10. Lu D. Integration of vegetation inventory data and Landsat TM image for vegetation classification in the western Brazilian Amazon // Forest Ecology and Management. – 2005. – № 213. – P. 369-383.
11. 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 – Vol. 198. – P. 149-167.
12. Lutz D., Washington-Allen R.A., Shugart H.H. Remote sensing of boreal forest biophysical and inventory parameters: a review // Can. J. Remote Sensing. – 2008. – Vol. 34, № 2. – P. 286-313.
13. USGS Global Visualization Viewer Режим доступа – <http://glovis.usgs.gov/>.
14. Spatially Explicit Large Area Biomass Estimation: Three Approaches Using Forest Inventory and Remotely Sensed Imagery in a GIS / M.A. Wulder, J.C. White, R.A. Fournier, J.E. Luther, S. Magnussen // Sensors. – 2008. – № 8. – P. 529-560.

RESEARCH OF RELATIONS BETWEEN REFLECTION SPECTRAL PROPERTIES OF WOOD PLANTATIONS OF THE BELGOROD REGION AND THEIR STRATUM PARAMETERS

E. A. TEREKHIN

*Belgorod State University,
Pobedy St., 85, Belgorod,
308015, Russia*

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

The article presents research data on relations between the stratum parameters of afforestations in Belgorod region (species composition, age, height) and their spectral catoptric properties evaluated to photos Landsat TM. It is fixed strong correlation between the afforestation stratum parameters and spectral index KT1.

Key words: afforestation stratum parameters, Landsat TM data, vegetation indexes, regression and variance analysis.