

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ФОРМИРОВАНИЕ ЯРКОСТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ СПЛОШНЫХ РУБОК НА ЗИМНИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ СРЕДНЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2013 г. А. А. Кардаков^{1*}, А. К. Кивисте¹, У. К. Петерсон^{1,2}

¹Эстонский университет естественных наук, Тарту, Эстония

²Тартуская обсерватория, Тыравере, Эстония

*E-mail: anton_kardakov@hotmail.com

Поступила в редакцию 15.03.2012 г.

В данной статье проанализированы факторы из таксационной базы данных, влияющие на формирование средней яркости пикселей возобновляющихся сплошных рубок на разностном снимке. Использован метод разностных изображений, вычитание значений яркости пикселей одного снимка из значений яркости другого и зимние снимки Landsat TM. Выявлены факторы, влияющие на выделительные различия площади классифицированных и полученных из базы данных объектов. Наибольшее влияние на формирование средней яркости пикселей возобновляющихся сплошных рубок на разностном снимке оказывают возраст древостоя и проводимые лесохозяйственные работы. Анализ факторов из таксационной базы данных, способных влиять на выделительные различия площадей между классифицированными и взятыми из таксационных баз данных, показал, что классы *Соседство с лесом* и *Соседство с рубкой* имеют более сильное влияние на различие площадей, нежели переменные таксационной базы данных.

Ключевые слова: возобновляющиеся сплошные рубки, зимние снимки Landsat TM, метод разностных снимков

DOI: 10.7868/S0205961412060048

ВВЕДЕНИЕ

Восстанавливающиеся природные ресурсы подвержены постоянным изменениям, меняется и лесной покров Земли. Мониторинг и оценка состояния лесов целесообразны при использовании данных дистанционного зондирования (ДЗ) (Song et al., 2007). С целью повышения достоверности получаемых данных, желательны их использование и последующий анализ с информацией из других источников – главным образом из таксационных баз данных (Исаев и др., 2009).

Архивные снимки, полученные при помощи различных спутников, являются незаменимым инструментом для изучения лесной сукцессии на обширных территориях в течение длительного времени. Данные с оптических сенсоров применялись для прогнозирования возраста древостоев с различной погрешностью (Schroeder et al., 2011).

Бореальные леса и леса умеренного климатического пояса подвержены частым нарушениям и вмешательствам, которые влияют на их отражательную способность. Изменения отражательной способности лесов обычно вызваны тремя различными силами: рост (Schroeder et al., 2007), природные явления, такие как наводнения (Lee,

Lee, 2010), пожары (Поморцев и др., 2008), очаги усыхания от вредителей и болезней (Goodwin et al., 2010) и антропогенные факторы – главным образом различные виды рубок (Healey et al., 2006). Данные изменения варьируются как по времени, так и по масштабу. Находить изменения, в том числе определение возрастного состава насаждений, возможно, основываясь на информации, получаемой с единичных изображений. Таким образом, были выявлены несколько общих классов сукцессии (Fiorella, Ripple, 1993; Peterson, Nilson, 1993; Jakubauskas, 1996). Возраст насаждений старше 20–25 лет сложно оценить, используя единичный снимок с должной степенью точности, результаты могут быть улучшены при использовании многовременных архивных снимков или их серий (Kennedy et al., 2007). После быстрого изменения отражения в первые 15–20 лет развития культур взаимосвязь (корреляция) отражательной способности и возраста насаждений в лесах умеренного пояса и в бореальных лесах становится слабой. Основываясь на изменениях структурных и композиционных факторов во времени, для каждого участка леса можно построить траектории или кривые восстановления, которые позволяют наблюдать динамику лесовосстановления

(Thomas et al., 2011). Траектории изменений дают возможность выявлять наличие изменений, но не описывают влияния параметров объектов на формирование отражательной способности.

Открытие Геологической службой США (USGS) архивов снимков среднего пространственного разрешения Landsat Thematic Mapper (TM) и их бесплатное распространение (Woodcock et al., 2008) увеличило применение различных автоматизированных алгоритмов, использующих для выявления изменений как пары, так и серии разновременных снимков (Huang et al., 2010; Kennedy et al., 2007).

Снимки, полученные в разное время, — интервал между снимками составляет как правило от нескольких до десятка лет (Lunetta et al., 2004; Masek et al., 2006) — сравниваются для выявления изменений в ландшафте. Благодаря резким яркостным изменениям, выявление сплошных рубок является наиболее успешной областью применения ДЗ ландшафта (Cohen et al., 1998; Wilson, Sader, 2002; Song, Woodcock, 2002). Однако картирование восстанавливающихся лесов (в данной работе — восстанавливающиеся сплошные рубки) остается сложной задачей, так как при использовании интервала между снимками, подходящего для выявления сплошных рубок, яркостные изменения едва различимы (Song et al., 2007). По сравнению с приспевающими и спелыми лесными массивами, в молодняках (насаждения, возраст которых менее 20 лет) с несомкнутыми или редкими кронами деревьев связь между возрастом и отражательной способностью сильно варьируется (Joyce, Olsson, 1999). Вариации способности различия типов условия места произрастания, способ лесовосстановительных работ, место расположения, происхождение, густота и состав насаждений (Schroeder et al., 2006).

Влияние ведущих факторов на изменение значений яркости объектов на снимках в бореальных лесах после сплошных рубок мало изучено. Поэтому необходимо изучение влияния таких параметров, как время, прошедшее после сплошной рубки, условия места произрастания и наличие лесохозяйственных работ, на формирование яркостных значений объектов. Точность определения возраста насаждений обычно ограничена.

Зимние снимки со сплошным снежным покровом с высокой точностью позволяют выявить различия спектральных яркостей контрастных объектов. Поздняя зима является лучшим сезоном для картирования лесного покрова, для разграничения древостоя и безлесистых территорий (Peterson et al., 2004), а также для выявления изменений растительного покрова после потрясений, таких, как вырубки, пожары, повреждения древостоя ветром или энтомофагами. В это время года контраст между лесом и безлесистыми тер-

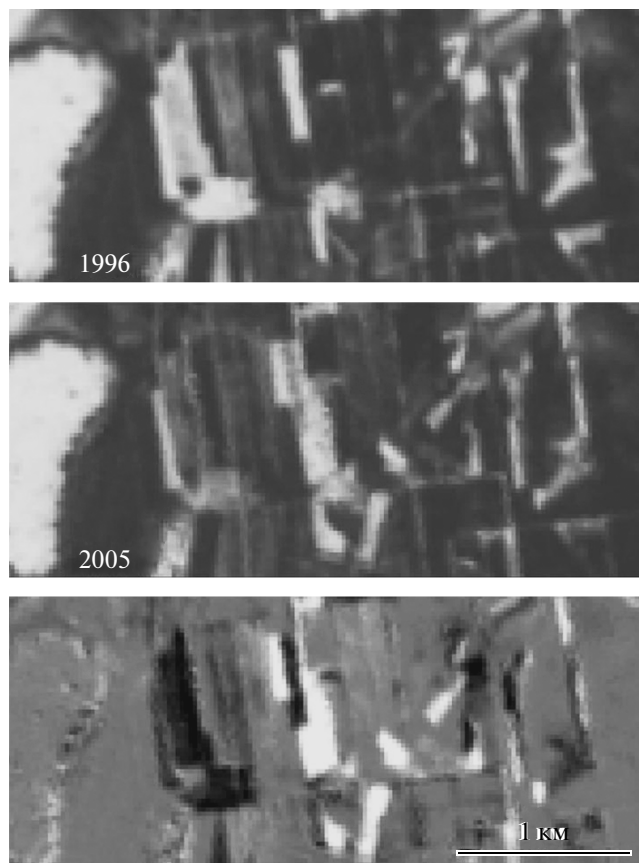


Рис. 1. Фрагмент зимних снимков Landsat TM, сделанных в условиях снежного покрова в марте 1996 и 2005 гг. Темные участки на разностном снимке являются восстанавливающимися сплошными рубками, светлые — свежими рубками, срубленными в промежутке между двумя снимками, в светло-серые тона окрашены объекты, не изменившиеся за время между снимками (как лес, так и безлесистые территории).

риториями с ярким снежным покровом позволяет выявлять даже незначительные различия в сомкнутости крон деревьев. Отражательная способность снежного покрова особенно высока в видимой и ближней ИК областях спектра (Кринов, 1947) — это соответствует спектральным каналам Landsat TM1–TM4. Отражательная способность снежного покрова увеличивается соответственно его толщине примерно до 15 см, последующее увеличение не ведет к существенному изменению отражательной способности (Robinson, Kulka, 1985).

Цель данной статьи — анализ факторов таксационной базы данных и созданных в ходе анализа изображений на формирование яркости восстанавливающихся сплошных рубок. Для выявления временных изменений использовались метод разностных изображений, вычитание значений яркости пикселей одного снимка из значений яркости другого (Warner et al., 2009) и зимние снимки Landsat TM, сделанные в условиях сплошного

снежного покрова (рис. 1). В ходе анализа выяснили, какие факторы имеют статистически значительное влияние на изменение яркости объектов на зимнем разностном снимке в ходе лесной сукцессии. Выявили факторы, влияющие на поведельные различия площади классифицированных и полученных из базы данных объектов. Сравнение разницы площадей сделано при равной общей площади классифицированных объектов и объектов из таксационной базы данных (изучены различия единичных объектов).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Географическая область исследования и исходные данные

Область исследования расположена в центральной Эстонии на территории Йыгеваского лесничества (58°43' с.ш. и 26°27' в.д.). На изучаемых территориях преобладают береза (*Betula pendula* и *Betula pubescens*), ель обыкновенная (*Picea abies*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) и осина обыкновенная (*Populus tremula*). Данный район был выбран в связи с его большой лесистостью, плоским рельефом и высокой интенсивностью лесохозяйственных работ (рубка леса, лесовосстановление).

В данной работе были использованы изображения со спутника Landsat TM, полученные 10 марта 1996 г. и 03 марта 2005 г. В течение двух недель, предшествующих дате спутниковых снимков, толщина снежного покрова оставалась в промежутке от 13 до 30 см. Сумма осадков в виде снега за десятидневный период, предшествующий снимкам, составляла менее 3 мм при постоянной среднесуточной температуре ниже нуля. Прозрачность атмосферы на момент обоих съемок, рассчитанная из входящих прямых солнечных лучей, была в промежутке 0.82–0.83. Долгосрочная средняя прозрачность в ясные дни в марте в районе 0.77 (Руссак, 2003). Уровень атмосферного тумана в этот период низок, горизонтальная видимость составляла 20 км. Данные о погоде были получены от Эстонского Института Метеорологии и Гидрологии (ЕМНИ) с метеостанции в Тыравере, расположенной в 20 км от района исследования.

Восстанавливающиеся сплошные рубки были выявлены при использовании векторной карты Центра управления государственными лесами Эстонии с границами выделов и таксационными данными, включающими в себя такие важные параметры, как возраст восстанавливающейся рубки и лесохозяйственные работы. Сплошные рубки являются наиболее распространенным видом рубок, большинство имеет правильную форму. В общей сложности было отобрано 332 регенерирующие вырубки. На изучаемой территории в относительно равных долях от общей площади пред-

ставлены береза (42%), ель обыкновенная (39%), и осина обыкновенная, которая произрастает на 26% территорий. На данной территории доминируют свежие борео-неморальные леса (44%), а заболоченные и перегнойно-болотные занимают 35% и 13% соответственно. Площадь восстанавливаемых вырубок варьировалась от 0.8 до 11.2 га, в среднем по 2.84 га. Среднее соотношение площади и периметра — очертание (форма) — было 1.21, с минимальным значением 0.96 и максимальным 1.76. Возраст регенерирующих вырубок варьировался от 9 до 18 лет по отношению ко второму снимку (2005 г.). В зависимости от года вырубки количество объектов варьировалось от 13 до 87. Несмотря на активное лесопользование, рубки ухода отсутствуют в трети изученных выделах. Наибольшее количество рубок ухода было сделано за три года перед датой второго изображения — в период с 2002 по 2004 г. (в год обработано от 36 до 49 объектов). Примерно треть лесов создана искусственным путем (посевом или посадкой), остальные — леса естественного происхождения.

Для контроля года восстанавливающейся рубки были использованы летние снимки Landsat TM 1987–1996 и материалы лесоустройства, включающие лесоустроительные планшеты и таксационные базы данных. Границы лесосек были визуально сравнены с ортофотоизображениями и Основной картой Эстонии (М 1 : 10000). Ортофотоизображения 1995 и 2003 гг. имеют пространственное разрешение от 0.25 до 0.5 м. Границы выделов векторной карты были при необходимости уточнены.

Изучаемые восстанавливающиеся рубки были срублены в период с 1987 по 1996 г. В данной статье использовались снимки спутника Landsat TM в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра (TM1–TM4).

Обработка изображений

Снимки Landsat TM были геометрически трансформированы в эстонскую систему координат — коническую проекцию Ламберта с пространственным разрешением 25 м и использованием линейного преобразования первого порядка (в данной проекции представлены векторные карты лесных выделов). Пространственная интерполяция была выполнена при использовании опорных пунктов с ортофотоизображений Основной карты Эстонии методом наименьших квадратов. В данном случае использовалась интерполяция методом ближайшего соседа (ступенчатая интерполяция). Различие преобразованных изображений от ортофотоизображений Основной карты Эстонии составило 0.4 пиксела, что является хорошим результатом (стандартом для снимков среднего пространственного разрешения является не более 0.5 пиксела).

В ходе данной работы были изучены факторы, влияющие на формирование средней яркости пикселей возобновляющихся сплошных рубок. Для выявления изменений использовался метод разности снимков. В ходе данного метода значения яркости пикселей более раннего по времени снимка вычитаются из значений яркости более позднего по времени снимка, которые предварительно преобразованы в шкалу яркости первого из них при помощи модели линейной регрессии (Corrin et al., 2004). Преобразование в единую шкалу яркости (нормализация) устраняет различия, обусловленные различиями атмосферных условий и калибровки сенсора. На разностном снимке негативные и позитивные значения пикселей соответствуют изменениям отражательной способности объектов.

Преобразование зимних снимков в одинаковую яркостную шкалу основано на бимодальном распределении значений пикселей на снимке и характеризуется существованием у кривой плотности двух локальных максимумов, которые определяются двумя значениями мода. Для нахождения линейной зависимости использовались 2, 5, 10, 90, 95, 98 значений процентилей (Peterson et al., 2004).

Восстанавливающиеся сплошные рубки имеют небольшую площадь и на снимках среднего пространственного разрешения Landsat TM представлены малым количеством пикселей (минимально допустимое количество пикселей, представляющих один выдел, равно 3). Для уменьшения влияния соседних выделов (смежных пикселей) изучаемые полигоны были буферизированы внутрь на один пиксел. В результате площадь некоторых сердцевин объектов составила один–два пиксела. Для увеличения достоверности результатов было принято решение не включать в анализ выделы с площадью менее трех пикселей. Таким образом, мы уверены, что сердцевинки изученных объектов с достаточной точностью отражают истинные яркостные значения восстанавливающихся сплошных рубок. Средняя яркость была рассчитана на основе сердцевин объектов без учета пикселей буферной зоны.

При анализе факторов, способствующих ошибке в оценивании площади восстанавливающихся сплошных рубок, разностный снимок был классифицирован на два класса – класс “изменившиеся” и класс “неизменные” пиксели, – с использованием порогового значения. Пороговое значение было найдено итеративно, путем сопоставления общей площади классифицированных рубок на разностном снимке и общей площади объектов по таксационной базе данных.

Пороговое значение было определено для разностных снимков четырех спектральных каналов спутника Landsat TM, использованных в данном

анализе. После определения порогового значения была составлена “карта изменений”. Был принят во внимание возможный эффект соседних выделов на изучаемые объекты. На разностном снимке “Соседи” могут быть со временем изменившимися (ставшими светлее или темнее) и со временем неизменившимися объектами. Пороговое значение для темных и светлых объектов определялось отдельно. Неизменившиеся пиксели были между двух пороговых значений. Пороговое значение для светлых соседей, показывающее возрастание яркости, было найдено как подходящее для классифицирования сплошных рубок на разностном снимке. Пороговое значение для темных соседей – как подходящее для восстанавливающихся сплошных рубок. Пороговые значения были найдены отдельно для каждого спектрального канала и применены для всей изучаемой территории. Как темные, так и светлые соседи считаются объектами в пределе одного пиксела за пределами самих объектов.

Статистическая обработка данных

Влияние факторов таксационной базы данных на разницу яркостных значений восстанавливающихся сплошных рубок в зимних условиях было оценено для четырех каналов спутника Landsat TM1–TM4 отдельно (синяя, зеленая, красная и ближняя ИК-области спектра). В ходе работы использована общая линейная модель (General Linear Model), главная задача которой заключается в определении взаимосвязи между несколькими независимыми переменными (предикторами) и зависимой переменной. В этом случае зависимой переменной являются разности яркостных значений на разностном снимке, сделанном в зимних условиях. Независимые переменные, рассмотренные в ходе данной работы, представлены в табл. 1А.

Дальнейший анализ факторов, влияющих на повидельные различия площади классифицированных и полученных из базы данных объектов, предполагал создание параметров, представленных в табл. 1Б

$$S_{rel} = \frac{(S_{db} - S_{cl})}{S_{db}}, \quad (1)$$

где S_{rel} – относительная разница площадей; S_{db} – площадь восстанавливающейся сплошной рубки из таксационной базы данных, га; S_{cl} – площадь восстанавливающейся сплошной рубки, классифицированная на основании разностного снимка, га.

Форма – рассчитанная по параметрам таксационной базы данных

$$SHAPE = \frac{0.25U}{\sqrt{S}}, \quad (2)$$

Таблица 1. Переменные, рассмотренные в ходе анализа

А	
<i>Возраст</i>	время, прошедшее после сплошной рубки (в годах)
<i>Рубки ухода</i>	рубки ухода в молодняках, сделанные в течение трех лет до даты позднего по времени снимка (уход производился в период с 2002 по 2004 гг.)
<i>Класс бонитета</i>	различия в условиях произрастания леса (в соответствии с классификацией М. Орлова), в таксации характеризуется несколькими классами бонитета, обозначаемыми порядковыми номерами: класс I означает лучшие условия произрастания леса, а последующие — их постепенное ухудшение
<i>Порода</i>	для анализа породы деревьев были сгруппированы в два класса; класс “хвойные” и класс “лиственные”
<i>Группы типов лесов</i>	группы лесов в соответствии с классификацией Я. Пааля (1997). В данной работе использованы шесть групп: 1) свежие борео-неморальные леса; 2) свежие бореальные леса; 3) перегнойно-болотные леса; 4) заболоченные леса; 5) травяно-болотные леса; 6) верхово-болотные леса
<i>Происхождение</i>	культура (образованная посевом или методом посадки) или естественное (семенное или порослевое)
Б	
<i>Форма</i>	среднее соотношение площади и периметра, рассчитанное по параметрам таксационной базы данных (2)
<i>Соседство с лесом</i>	относительная площадь возобновляющихся сплошных рубок, граничащих с объектами класса “возобновляющиеся выработанные делянки”, которые представлены на разностном снимке темными объектами
<i>Соседство с рубками</i>	относительная площадь возобновляющихся сплошных рубок, граничащих с объектами класса “выработанные делянки”, представленными на разностном снимке светлыми объектами
<i>Площадь</i>	площадь выдела из таксационной базы данных, га

где U периметр и S площадь выдела (Jagomägi et al., 1988).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Взаимосвязь изменения разницы яркостных значений восстанавливаемых сплошных рубок в зимних условиях и параметров таксационной базы данных была изучена для четырех спектральных каналов Landsat TM отдельно (TM1, TM2, TM3 и TM4). Наш анализ охватывает изменения, произошедшие за период между снимками (с 1996 по 2005 гг.). В зависимости от спектрального канала, 19–20% (скорректированный коэффициент детерминации) вариации яркости на разностном снимке было описано факторами из таксационной базы данных. Изменения яркостных значений восстанавливаемых делянок на разностном снимке в зависимости от прошедшего после вырубке времени, представлены на рис. 2. Схожие тренды наблюдаются для трех видимых и ближнего ИК-каналов спутника Landsat TM. На основе изученных ранних стадий наблюдается линейная зависимость между возрастом после рубки и разностью яркостных значений. Чем больше времени прошло после вырубке, тем большее негативное значение имеют выделы на разностном снимке, — тем более велико изменение яркостных значений. Анализ остатков не выявил систематических различий между отклонениями модели и временем после рубки (рис. 3а).

Первые четыре спектральных канала спутника Landsat TM имеют примерно одинаковую чувствительность к данному типу изменений. Были рассмотрены и единичные изображения. При помощи этих снимков изменения не выявляются, описываются только значимость факторов влияющих на формирование яркостных значений (табл. 2). Кроме фактора *Возраст*, значимое влияние на формирование разницы яркостных значений имеет фактор *Рубки ухода* во всех рассмотренных каналах (TM1–TM4). Остатки линейной модели (отсутствует влияние времени после сплошной рубки) выявили криволинейную взаимосвязь между яркостными изменениями и бонитетом насаждений (рис. 3б), однако множественная модель не подтвердила статистическую значимость этого фактора для формирования яркости в первых трех спектральных каналах (табл. 2). Добавление квадратичного значения фактора *Класс бонитета* не способствовало достоверной связи параметров. *Порода* была проанализирована в отношении класса “хвойные” леса. Анализ не выявил статистической зависимости ни в одном из каналов. Данный фактор описывает хозяйственную деятельность по отношению к культурам, так как в зависимости от породы применяются различные методы хозяйственной деятельности (в таксационной базе данных *Порода* определяет хозяйственную деятельность). *Происхождение* анализировалось в отношении насаждений, возникших естественным путем (семенным или порос-

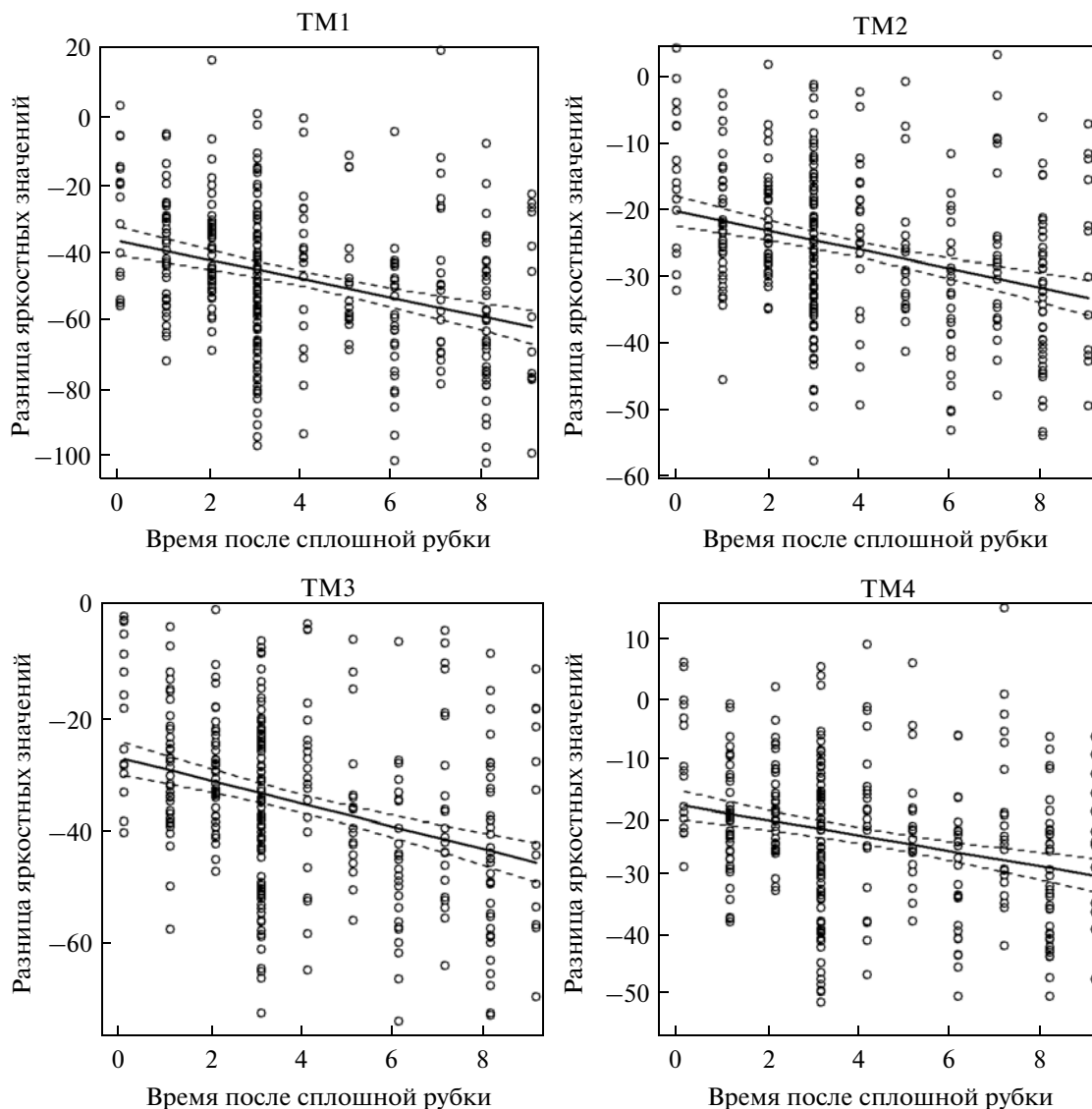


Рис. 2. Зависимость яркостных значений на разностном снимке от времени, прошедшем после сплошной рубки в видимом и ИК спектрах спутника Landsat TM. Сплошная линия – регрессионная прямая, малые штриховые линии – доверительные границы средней модели.

левым). При рассмотрении всего объема данных значительного влияния найдено не было. В выделах культурного и естественного происхождения средние значения остатков отличаются значительно (рис. 3з). При отдельном анализе классов “хвойные” и “лиственные” леса выяснилось, что формирование яркостных значений хвойных зависит от происхождения. Схожий результат был получен при анализе молодых насаждений с выявленными рубками ухода (табл. 3). Предварительно группы типов лесов были упорядочены в соответствии с их продуктивностью. Анализ проводился в отношении самых продуктивных и вместе с тем наиболее широко представленных свежих бореально-неморальных лесов. На яркостные значения во всех частях изучаемого спектра

влияют свежие бореальные и перегнойно-болотные Группы типов лесов, травяно-болотные – только в первых трех. Анализ остатков не выявил линейной зависимости яркостных значений от фактора Группы типов лесов (рис. 3в). Фактор Группы типов лесов имеет более сильное влияние на формирование яркостных значений разностного снимка, нежели фактор Класс бонитета (скорректированный коэффициент детерминации попарного анализа $R^2 = 0.01$ и $R^2 = 0.05$ соответственно).

Факторы, влияющие на повидельные различия площади и разницу между классифицированными выделами, при использовании разностного снимка и таксационной базы данных, показывают, что окружающие объекты имеют большее

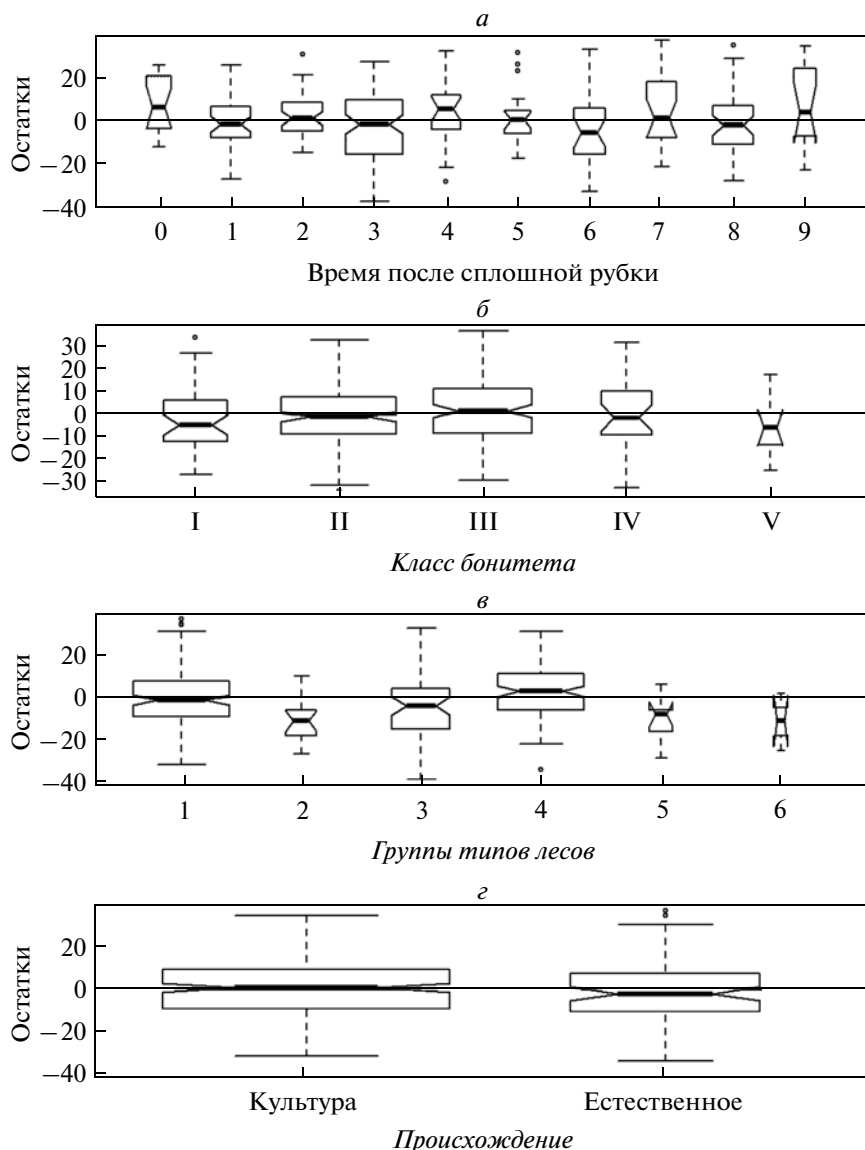


Рис. 3. Графики коробок, представляющие зависимость остатков линейного тренда красного спектрального диапазона Landsat TM3: *а* – от времени прошедшего после сплошной рубки; *б* – от класса бонитета насаждений; *в* – от группы типов лесов (1 – свежие борео-неморальные леса; 2 – свежие бореальные леса; 3 – перегнойно-болотные леса; 4 – заболоченные леса; 5 – травяно-болотные леса; 6 – верхово-болотные леса); *г* – от происхождения. Размер коробок зависит от количества анализируемых объектов.

влияние на различие площадей, нежели переменные таксационной базы данных (табл. 4). Окружающие восстанавливающиеся сплошные рубки участки могут быть классифицированы при помощи двух классов – класса “изменившиеся” и класса “неизменные”. Изменения могут происходить в двух направлениях. Соседние объекты могут быть выработанными делянками, представленными на разностном снимке “светлыми” объектами, и выделами, находящимися на различных стадиях восстановительной сукцессии, представленными на разностном снимке “темными” объектами. С увеличением площади пригранич-

ных выделов, относящихся к классу *Соседство с лесом* (темных объектов), значения относительной разницы площадей, классифицированных при помощи разностного снимка и полученных с использованием таксационной базы данных, уменьшаются (рис. 4а). Увеличение площади приграничных выделов, относящихся к классу *Соседство с рубкой*, ведет к увеличению значений относительной разницы площадей (рис. 4б). Различие между площадями зависит и от площади из таксационной базы данных. С увеличением площади значения относительной разницы площадей увеличиваются (рис. 4в). Объекты, имеющие

Таблица 2. Результаты множественной регрессии раннего, позднего и разностного снимков для каналов спутника Landsat TM1-TM4

	1996 г.				2005 г.				Разностный снимок			
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM1	TM2	TM3	TM4	TM1	TM2	TM3	TM4
<i>Возраст</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
<i>Рубки ухода</i>	0.273	0.296	0.274	0.400	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
<i>Класс бонитета</i>	0.033	0.040	0.047	0.106	<0.001	0.001	0.002	0.001	0.050	0.095	0.099	0.023
<i>Класс бонитета²</i>	0.025	0.029	0.033	0.062	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.061	0.100	0.117	0.027
<i>Порода</i>												
лиственные	0.695	0.966	0.940	0.920	0.727	0.805	0.936	0.361	0.969	0.756	0.879	0.256
<i>Группы типов лесов</i>												
свежие бореальные	0.377	0.271	0.340	0.461	0.088	0.073	0.104	0.106	0.007	0.002	0.005	0.011
перегнойно-болотные	0.173	0.248	0.256	0.286	0.002	0.002	0.005	0.010	0.028	0.023	0.037	0.048
заболоченные	0.237	0.238	0.259	0.203	0.331	0.157	0.231	0.168	0.985	0.671	0.817	0.696
травяно-болотные	0.115	0.078	0.099	0.114	0.589	0.798	0.715	0.686	0.042	0.046	0.041	0.052
верхово-болотные	0.946	0.917	0.959	0.729	0.186	0.585	0.222	0.490	0.121	0.479	0.152	0.264
<i>Происхождение</i>												
культура	0.864	0.678	0.659	0.606	0.292	0.414	0.313	0.554	0.180	0.193	0.119	0.247
Скорректированный R²	0.100	0.105	0.110	0.087	0.336	0.341	0.350	0.306	0.191	0.196	0.199	0.190

Примечание. Вероятности значимости менее чем в 0.05 выделены жирным шрифтом.

Таблица 3. Результаты множественной регрессии для канала спутника Landsat TM3 для различных выборок

	Класс “хвойные”	Класс “лиственные”	Молодняки с рубками ухода
<i>Возраст</i>	<0.001	<0.001	<0.001
<i>Рубки ухода</i>	0.016	0.014	NA
<i>Класс бонитета</i>	0.553	0.346	0.716
<i>Класс бонитета²</i>	0.859	0.326	0.774
<i>Порода</i>			
лиственные	NA	NA	0.648
<i>Группы типов лесов</i>			
свежие бореальные	0.245	0.012	0.206
перегнойно-болотные	0.561	0.662	0.259
заболоченные	0.174	0.032	0.485
травяно-болотные	0.002	0.209	NA
верхово-болотные	0.040	NA	0.122
<i>Происхождение</i>			
культура	0.024	0.098	0.033
Скорректированный R²	0.217	0.238	0.234

Примечание. Вероятности значимости менее чем в 0.05 выделены жирным шрифтом.

более правильную форму (квадратные объекты имеют индексное значение, равное одному), имеют меньшую относительную разницу площадей. С увеличением индекса формы выдел приобретает неправильную форму, увеличивается негативная разность относительных площадей (рис. 4г).

ОБСУЖДЕНИЕ

Спектральная отражательная способность покрытых снегом выделов на снимке, сделанном в зимних условиях, зависит от типа и густоты растительности. Увеличивающиеся количество дере-

Таблица 4. Результаты множественной регрессии, показывающие взаимосвязь между относительной разницей площадей и проанализированными факторами

	Оценка	Стд. ошибка	t-критерий	Pr(> t)
<i>Возраст</i>	−0.001	0.007	−0.137	0.891
<i>Рубки ухода</i>	0.010	0.032	0.310	0.757
<i>Класс бонитета</i>	0.020	0.019	1.065	0.288
<i>Порода</i>				
лиственные	−0.016	0.043	−0.362	0.718
<i>Группы типов лесов</i>				
свежие бореальные	−0.038	0.100	−0.381	0.703
перегнойно-болотные	−0.038	0.048	−0.809	0.420
заболоченные	−0.024	0.036	−0.676	0.500
травяно-болотные	−0.111	0.142	−0.780	0.436
верхово-болотные	−0.206	0.148	−1.398	0.164
<i>Происхождение</i>				
культура	−0.019	0.048	−0.385	0.701
форма	−0.130	0.102	−1.271	0.206
<i>Соседство с лесом</i>	−0.530	0.036	−14.582	<0.001
<i>Соседство с рубками</i>	0.159	0.048	3.301	<0.001
<i>Площадь</i>	0.100	0.013	7.727	<0.001
Скорректированный R²				0.660

Примечание: Вероятности значимости менее чем в 0.05 выделены жирным шрифтом.

вьев и ветвей, увеличение их теней уменьшает яркость восстанавливающихся выделов. Проведенный анализ представляет яркостные изменения в восстанавливающихся выделах в зависимости от возраста (времени после сплошной рубки). Молодые насаждения имеют наибольшие яркостные значения. Последующее развитие ведет к постепенному уменьшению яркостных значений в видимом и ближнем ИК частях спектра. Несмотря на то, что траектории сукцессии являются нелинейными для 30–40-летних насаждений, изучение ранних этапов сукцессии 10–15 лет возможно с использованием линейных моделей. Данное утверждение верно для зимних снимков.

Каналы Landsat TM1–TM4 имеют одинаковую чувствительность. Результаты подтверждают ранее опубликованные работы (Peterson et al., 2004; Kardakov et al., 2009). Изменения яркостных значений уменьшаются после увеличения сомкнутости крон деревьев и кустарников на участке. Была замечена вариативность внутри возрастных классов восстанавливающихся рубок: так, на более плодородных выделах рост деревьев, а вместе с ним и изменения яркостных значений более значимы, нежели в менее плодородных. Взаимоотношение изменений между яркостными изменениями на разностном снимке и бонитетом насаждений по классификации М. Орлова возросло

внутри классов I–III, которые имели более быстрый прирост. Индексы бонитета IV–V имеют обратную связь. Эти выделы наименее привлекательны с лесохозяйственной точки зрения, и рубки ухода здесь, как правило, не производятся.

Значения скорректированного коэффициента детерминации линейной модели, объясняющие среднее значение пикселей восстанавливающихся выделов на разностном снимке Landsat TM, довольно малы (0.19–0.20). Схожие результаты найдены и в других работах (Song et al., 2007).

Фактор *Порода* показывает, что в молодых насаждениях разграничение классов “хвойные” и “лиственные” возможно на разностном снимке в зимних условиях.

Анализ факторов из таксационных баз данных, способных влиять на повыдельные различия площадей между классифицированными и взятыми из таксационных баз данных, показал, что классы *Соседство с лесом* и *Соседство с рубкой* имеют более сильное влияние на различие площадей, чем остальные параметры. Учитывая расчетную формулу относительной разницы площадей (2) можно сделать вывод, что площадь выдела, классифицированного с разностного снимка, была больше, нежели площадь, представленная в таксационной базе данных, если его окружали регенерирующие

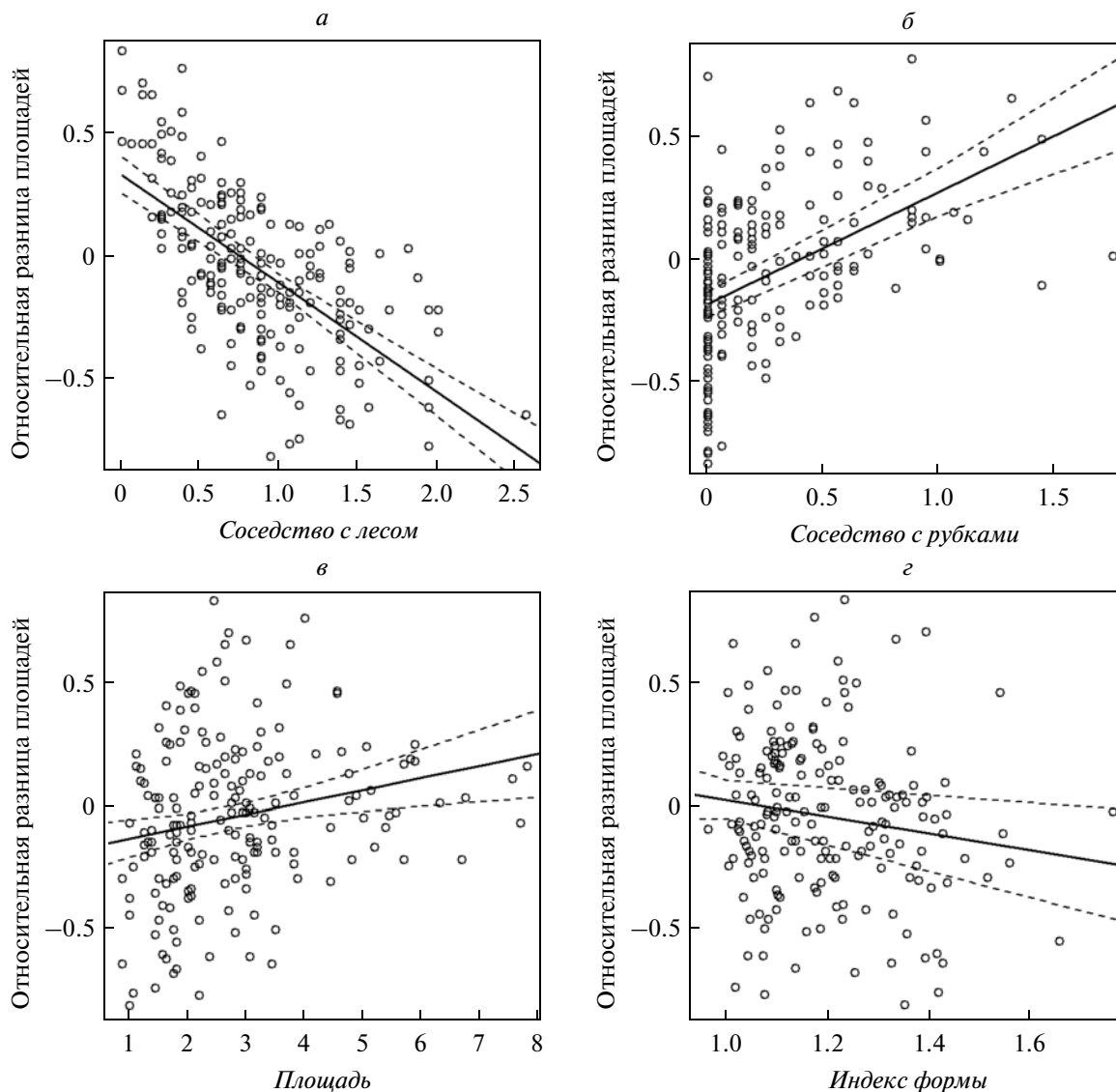


Рис. 4. Зависимость значений относительной разницы площадей от: *а* – соседства с лесом; *б* – соседства с рубками; *в* – площади; *г* – индекса формы. Сплошная линия – регрессионная прямая, малые штриховые линии – доверительные границы средней модели.

выделы – темные объекты. Площадь, классифицированная при помощи разностного снимка, была меньше площади таксационной базы данных, если соседние выделы были срублены в период между двух рассматриваемых снимков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье мы оценили влияние факторов из таксационной базы данных на формирование яркостных значений выделов на разностном снимке, сделанном в зимнее время. Выяснили, что первые четыре спектральных канала спутника Landsat TM имеют примерно одинаковую чувствительность к данному типу изменений. Время, прошедшее после сплошной рубки, оказывает

наибольшее влияние на формирование яркостных значений во всех четырех изученных диапазонах (видимый и ближний ИК). Значимое влияние на формирование разницы яркостных значений во всех рассмотренных каналах имеет и фактор *Рубки ухода*.

Изучили факторы, влияющие на повыделные различия площади классифицированных и полученных из базы данных объектов, сравниваемых при равной общей площади классифицированных и таксационных баз данных (изучены различия единичных объектов). Выяснили, что окружающие объекты оказывают большее влияние на разницу площадей, нежели факторы из таксационной базы данных описывающие свойства выделов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исаев А.С., Князева С.В., Пузаченко М.Ю., Черненко-ва Т.В. Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 2. С. 55–66.
- Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 272 с.
- Пааль Я. Классификация типов местопроизрастания в Эстонии. (На эст. яз.). Таллинн: Министерство Охраны Окружающей Среды, 1997. 297 с.
- Поморцев О.А., Ведешин Л.А., Дальбинов А.А. Лесные пожары: от мониторинга к прогнозу (на примере Якутии) // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 2. С. 57–67.
- Руссак В. Прозрачность атмосферы // Эстонский справочник по изучению излучения. (На эст. яз.) / Под ред. Тооминг Х. Таллинн: Эстонский Институт Метеорологии и Гидрологии, 2003. 384 с.
- Cohen W.B., Fiorella M., Gray J., Helmer E., Anderson K. An efficient and accurate method for mapping forest clearcuts in the Pacific Northwest using Landsat imagery // Photogram. Eng. Rem. Sens. 1998. V. 64. № 4. P. 293–300.
- Coppin P., Jonckheere I., Nackaerts K., Muys B., Lambin E. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review // Int. J. Rem. Sens. 2004. V. 25. № 9. P. 1565–1596.
- Fiorella M., Ripple W.J. Analysis of conifer forest regeneration using Landsat Thematic Mapper data // Photogram. Eng. Rem. Sens. 1993. № 59. P. 1383–1388.
- Goodwin N.R., Magnussen S., Coops N.C., Wulder M.A. Curve fitting of time-series Landsat imagery for characterizing a mountain pine beetle infestation // Int. J. Rem. Sens. 2010 V. 31. № 12. P. 3263–3471.
- Healey S.P., Yang Z., Cohen W.B., Pierce D.J. Application of two regression-based methods to estimate the effects of partial harvest on forest structure using Landsat data // Rem. Sens. Environ. 2006. № 101. P. 115–126.
- Huang C., Goward S.N., Masek J.G., Thomas N., Zhu Z., Vogelmann J.E. An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks // Rem. Sens. Environ. 2010. № 114. P. 183–198.
- Jagomägi J., Külvik M., Mander Ü., Jacuchno V. The structural-functional role of ecotones in the landscape // Ekológia (ČSSR). 1988. V. 7. № 1. P. 81–94.
- Jakubauskas M.E. Thematic Mapper characterization of lodgepole pine seral stages in Yellowstone National Park, USA // Rem. Sens. Environ. 1996. № 56. P. 118–132.
- Joyce S., Olsson H. Long-term forest monitoring with temporal-spectral trajectories from Landsat TM data. In Forest Information from Remote Sensing // Proc. IUFRO Conf. Rem. Sens. and For. Monit. 1–3 June 1999, Rogow, Poland. EUR 19530 EN, Luxembourg / Eds. Zawila-Niedzwiecki T., Brach M. 1999. P. 477–489.
- Kardakov A., Kiviste A., Peterson U. Assessment of Driving Factors Affecting Radiance Changes in Regenerating Mixed Forest Clearcuts Using Landsat Winter Imagery // Balt. Forest. 2009. V. 15. № 2. P. 216–225.
- Kennedy R.E., Cohen W.B., Schroeder T.A. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics // Rem. Sens. Environ. 2007. № 110. P. 370–386.
- Lee K.S., Lee S.I. Assessment of post-flooding conditions of rice fields with multi-temporal satellite SAR data // Int. J. Rem. Sens. 2010 V. 24. № 17. P. 3457–3465.
- Lunetta R.S., Johnson D.M., Lyon J.G., Crotwell J. Impacts of imagery temporal frequency on land-cover change detection monitoring // Rem. Sens. Environ. 2004. № 89. P. 444–454.
- Masek J.G., Collatz G.J. Estimating forest carbon fluxes in a disturbed southeastern landscape: Integration of remote sensing, forest inventory, and biogeochemical modelling // J. Geophys. Res. 2006 V. 111. G01006. doi:10.1029/2005JG000062.
- Peterson U., Nilson T. Successional reflectance trajectories in northern temperate forests // Int. J. Rem. Sens. 1993. № 14. P. 609–613.
- Peterson U., Piissa K., Liira J. Issues related to delineation of forest boundaries on Landsat Thematic Mapper winter images // Int. J. Rem. Sens. 2004. V. 25. № 24. P. 5617–5628.
- Robinson D.A., Kukla G. Maximum surface albedo of seasonally snowcovered lands in the Northern Hemisphere // J. Clim. and Appl. Meteor. 1985. V. 24. P. 402–411.
- Schroeder T.A., Cohen W.B., Song C., Canty M.J., Yang Z. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon // Rem. Sens. Environ. 2006. № 103. P. 16–26.
- Schroeder T.A., Cohen W.B., Yang Z. Patterns of forest regrowth following clearcutting in western Oregon as determined from a Landsat time-series // Forest Ecol. and Managem. 2007. № 243. P. 259–273.
- Schroeder T.A., Wulder M.A., Healey S.P., Moisen G.G. Mapping wildfire and clearcut harvest disturbances in boreal forests with Landsat time series data // Rem. Sens. Environ. 2011. № 115. P. 1421–1433.
- Song C., Woodcock C.E. The spatial manifestation of forest succession in optical imagery. The potential of multiresolution imagery // Rem. Sens. Environ. 2002. № 82. P. 271–284.
- Song C., Schroeder T.A., Cohen W.B. Predicting temperate conifer forest successional stage distributions with multi-temporal Landsat Thematic Mapper imagery // Rem. Sens. Environ. 2007. № 106. P. 228–237.
- Thomas N.E., Huang C., Goward S.N., Powell S., Rishmawi K., Schleeweis K., Hinds A. Validation of North American Forest disturbance Dynamics derived from Landsat time series stacks // Rem. Sens. Environ. 2011. № 115. P. 19–32.
- Warner T.A., Nellis M.D., Foody G.M. et al. The SAGE handbook of remote sensing / Eds. Warner T.A., Nellis M.D., Foody G.M. SAGE Publications Ltd., 2009. 568 p.
- Wilson E.H., Sader S.A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery // Rem. Sens. Environ. 2002. № 80. P. 385–396.
- Woodcock C.E., Allen R., Anderson M., et al. Free access to Landsat imagery // Science. 2008. V. 320. № 5879. P. 1011.

Radiance Changes of Regenerating Clear-Felled Areas Using Moderate Spatial Resolution Winter Images

A. A. Kardakov^{1*}, A. K. Kiviste¹, U. K. Peterson^{1,2}

¹Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia

²Tartu Observatory, Tõravere, Estonia

This paper analyses forestry database variables that are candidates to have a significant effect on radiance changes on a difference image. The difference image was calculated from two Landsat TM winter scenes imaged with a time interval of nine years. Another analysis was performed to investigate the factors that cause patch-wise differences in area estimates when the patch areas noted in the database were compared to the areas of the same patches classified on the satellite image. A significant effect of patch age - time passed since disturbance of clearcut logging on the radiance difference of regenerating patches on a difference image. The nature of neighbors either dark or bright had a more significant effect on the errors of patch area estimates rather than the database parameters of the patches themselves.

Keywords: Clearcut regeneration, Landsat TM winter images, difference image method