

УДК 574.474, 504.064.36:574, 502.4

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЛАНДШАФТНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЦЕНТРАЛЬНО-ЛЕСНОМ ЗАПОВЕДНИКЕ

© 2014 г. Ю. Г. Пузаченко, И. П. Котлов, Р. Б. Сандлерский

*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова, РАН
Центрально-лесной государственный заповедник. Нелидовский р-н, Тверская обл.*

Поступила в редакцию 28.05.2012 г.

По результатам анализа различий отражения солнечной радиации в спектральных каналах в двух сценах спутника Landsat за март 1986 г. и март 2010 г. установлен масштаб и характер изменений растительного покрова, для которого выявлен баланс между разрушением и восстановлением. Небольшое нарушение баланса происходит в результате жизнедеятельности бобров, приводящей к обезлесению пойм ручьев и рек первого–второго порядков. Показаны различия в темпах восстановления леса на вырубках и возникновение квазиустойчивых сообществ мелколиственных лесов на старопашотных землях, а так же разрушение сосновых лесов на верховых болотах, и лесов, прилегающих к болотам с увеличением площади последних.

Ключевые слова: мониторинг, растительность, ландшафтный покров, лес, верховое болото, мультиспектральная дистанционная информация.

Мониторинг состояния ландшафтного покрова рассматривается как средство, обеспечивающее управление хозяйственной деятельностью, способствующее реализации стратегии устойчивого развития, сохранению среды, оценке круговорота углерода, масштабов природных и антропогенных нарушений и самовосстановления экосистем [1, 2, 12]. Наиболее естественной основой его реализации являются мультиспектральные измерения отражения солнечной радиации со спутников. Особо охраняемые природные территории, включающие в себя не затрагиваемое хозяйственной деятельностью ядро, и охранную зону с традиционными формами землепользования, создают хорошую основу для понимания воздействия на динамику ландшафтного покрова различных форм землепользования [3]. В предлагаемом сообщении динамика растительного покрова оценивается на основе сравнения сцен спутника Landsat TM за март 1986 и март 2010 гг. для территории Центрально-лесного государственного природного биосферного заповедника, его охранной зоны и прилегающих территорий.

Общие положения. Отражение солнечной радиации от земной поверхности определяет состояние растительности: соотношение видов, про-

ективное покрытие, запас фитомассы, положение растительных сообществ на местности. Наряду с этими относительно консервативными условиями, отражение в различных каналах существенно зависит от сезона года, времени суток и погоды [8–11]. В результате изображения, полученные в разное время в течение даже одного года и разного времени суток, не являются полностью подобными. Так изображения, полученные для периода с большим количеством осадков, принципиально отличаются от таковых для того же месяца, но в условиях засухи. Эта чувствительность к высокочастотной динамике сама по себе открывает широкие возможности исследования функционирования экосистем, но создает существенные искажения при выделении долговременных изменений, отражающих изменения собственно растительного покрова. Так как отражение солнечной радиации от лесного полога во всех спектральных каналах всегда существенно ниже, чем от травяной и кустарниковой растительности и тем более от оголенной почвы, эти искажения не столь существенны для распознавания катастрофических преобразований растительного покрова, таких как вырубки, ветровалы, пожары, дефолиация в результате размножения насекомых вредителей или мощного атмосферного загрязнения. Иск-

жения становятся существенными при попытке воспроизведения медленных восстановительных сукцессионных смен растительности или смены в пространстве одного типа растительного покрова другим.

Р. Corripin с соавт. [10], обобщая мировой опыт обнаружения изменений по двум или сериям сравниваемых мультиспектральных изображений, выделяет шесть основных методов: 1) классификация по двум или нескольким срокам и идентификация изменений через кросстабуляцию, 2) одновременная классификация двух или нескольких изображений, 3) вычисление разности между каналами, 4) определение отношения между каналами, 5) линейные преобразования (методы главных компонент, ортогонализации *tasselled cap*, векторного анализа, оценивающие изменения по дистанциям между ортогонализированными данными для сравниваемых изображений, регрессионный анализ одного срока относительно другого), 6) композиционный анализ, использующий априорную классификацию состояния поверхности и связанные с ними варианты дистанций между соответствующими полосами. Отмечается, что наиболее широко используется метод разностей, но столь же часто используются одновременно несколько методов и их сочетаний.

Материал и принятая методика анализа. Рассматриваемая территория с координатами в углах прямоугольника 32.607781 в.д., 56.682393 с.ш., 33.230169 в.д., 56.682798 с.ш., 32.611149 в.д., 56.354927 с.ш., 33.228192 в.д., 56.355327 с.ш. общей площадью 139.2 тыс. га. расположена на юге Валдайской возвышенности с высотами от 200 до 240 м н.у.м. Площадь собственно заповедника 24.415 тыс. га, охранной зоны – 46.061 тыс. га. На рассматриваемой территории представлено три основных типа местности: моренные гряды, сформированные московским и валдайским оледенением, плоские озерные равнины на месте приледниковых озер и флювиогляциальные равнины в южной части территории [5]. Отложения морены и озер перекрыты лессовидным покровным суглинком. Для моренных гряд характерны южно-таежные широколиственно-еловые леса и их производные, для озерных и флювиогляциальных равнин – бореальные еловые леса. На пологих склонах моренных гряд и в отдельных понижениях озерных равнин развиты верховые болота. На озерных отложениях в составе древесного полога единично или небольшими группами встречается сосна. По болотам и их окраинам типично распространение сообществ с участием сосны. По окраинам болот иногда встречаются участки сомкнутых сосняков с возрастом 200–300 лет [7]. В

охранной зоне во второй половине XX в. произведены промышленные рубки, уничтожившие почти все еловые леса. В конце XX в. и первом десятилетии XXI в. добиваются ранее недорубленные участки. Небольшие по площади сплошные вырубki были также проведены в южной части заповедника в период его закрытия (1951–1960 гг.). Естественными факторами динамики растительного покрова являются ветровалы, охватывающие большие площади [4]. В северной части рассматриваемой территории сплошной ветровал на большой площади произошел в 1987 г., а в южной части – в 1996 г. Локальные выпадения отдельных крупных деревьев, открывающие окна в полог с линейными размерами 10–20 м происходят постоянно. Следы более ранних ветровалов достаточно типичны. Вторым фактором разрушения лесов, проявившемся в последние 20 лет, является деятельность бобров, в результате которой вдоль ручьев первого-второго порядков образовались “бобровые луга”. Пожары, в силу очень большого количества осадков – редкое явление, но в 1998 г. в результате сухой грозы в самом центре заповедника возник верховой пожар.

Для рассматриваемой территории имеется 22 сцены Landsat TM и ETM. Самая ранняя сцена соответствует марту 1986 г., а самая поздняя – марту 2010 г. Таким образом, анализ изменения растительного покрова оценивается для временного интервала в 24 года.

На рассматриваемой территории с 1996 г. по настоящее время проведено более 3000 описаний растительности и почв вдоль трансекты с регулярным шагом опробования в 20 м, в характерных точках, выделенных на местности. В анализе используются данные с 2005 г., наиболее сопоставимые с состоянием растительности в 2010 г., однако быстротекущие изменения растительности и точность привязки описаний по GPS в сомкнутом лесе могут вносить в отношения между свойствами растительности и мультиспектральным отражением солнечной радиации, измеренной со спутника Landsat, определенный шум.

Оценка изменений растительного покрова осуществлялась методом главных компонент, на основе которого, в частности, выделены каналы, используемые в анализе. Для того чтобы снизить различия в яркостях, определяемые погодными условиями конкретного года, их значения ранжировались в процентах от среднего. Для доказательства чувствительности измерений яркости в каналах к изменению растительного покрова проведен статистический одномерный и многомерный анализ их связи с высотой, сомкнутостью

леса, общим запасом древесины и процентом участия в насаждениях ели и лиственных пород. Для преобразованных значений яркости для стартовой сцены 1986 г., как и одновременно для двух сцен, применялся метод беспороговой дихотомической классификации. Классы с близкими значениями яркости по двум сценам индицируют практически неизменные состояния, а изменения, его тип и масштаб фиксируются по знаку и масштабу различий яркостей в двух сроках. Также был применен метод множественной регрессии от значений каналов в марте 1986 г. к значениям в 2010 г. Изменения идентифицировались на основе классификации остатков от регрессии. Наиболее четкие и естественно интерпретируемые результаты получены на основе оценки изменений методом прямой разности. Другие методы дают сходные, но менее детализируемые результаты. В настоящем сообщении рассматриваются результаты, полученные методом разностей и методом совместной классификации двух сцен.

Представления о связи отражения, измеренного в разных спектральных каналах, с состояниями растительности, позволяют на качественном уровне определить характер и масштабы изменений за исследованный период. Полученные результаты представлены для основных состояний растительного покрова заповедника и охранной зоны в 1986 г.: хвойные леса, лиственные леса, молодые и редкостойные леса, болота и безлесные территории, включающие в себя селитьбы, луга и вырубки, существовавшие в 1986 г. Собственно болота выделены на основе классификации по изображениям в 2007 г., охватывающим все сезоны (сцены за февраль, апрель, июнь, август).

Предварительный анализ данных. В табл. 1 приведены средние значения яркости в системе измерения спутника Landsat. В 1986 г. было существенно теплее, чем в 2010 г. и в каналах, соответствующих области поглощения влаги (Инфракрасный-В5, Инфракрасный-В7), яркость в 1986 г. существенно ниже, чем в 2010 г., то есть в 1986 г. снег содержал больше воды. Отражение в голубом канале в 1986 г. существенно выше, чем в 2010 г., что, возможно, определяется разным состоянием атмосферы. В остальных каналах различия средних и дисперсий невелики и не совпадают по знаку.

Применяя метод главных компонент, получаем, что четыре фактора описывают 98% варьирования. Используя процедуру ротации, устанавливаем, что каждой оси четырехмерного пространства соответствуют естественные группы каналов (табл. 2).

Первой компоненте соответствуют первые четыре канала 1986 г. (визуальные и ближний инфракрасный), чувствительные к свойствам растительного покрова. Первая компонента вносит существенный вклад в третью, которой соответствуют те же каналы, но в 2010 г. Обратный вклад третьей компоненты в первую – несколько меньше.

Второй компоненте соответствуют два ближних инфракрасных канала в 2010 г. Эта компонента практически не содержит информации о всех других. Наконец, четвертая компонента с отрицательным знаком описывает те же каналы, но в 1986 г., и эта компонента вносит относительно большой вклад в третью. Ортогональность

Таблица 1. Статистические параметры сцен Landsat TM, включенных в анализ. Яркости поверхности земли в исходных значениях каналов Landsat

Дата	Канал	Среднее	Минимум	Максимум	Ср. кв. откл.
21 марта 1986	Голубой В1	123.6	52.0	255.0	66.99
	Зеленый В2	55.1	18.0	165.0	36.37
	Красный В3	56.5	13.0	187.0	42.72
	Ближний инфракрасный В4	54.5	19.0	148.0	29.78
	Инфракрасный В5	17.5	5.0	55.0	4.09
	Инфракрасный В7	8.7	2.0	27.0	1.84
	Температура °С	0.9	-3.5	5.5	1.36
23 марта 2010	Голубой В1	100.8	29.0	255.0	64.99
	Зеленый В2	48.2	6.0	181.0	38.29
	Красный В3	53.2	6.0	214.0	48.17
	Ближний инфракрасный В4	58.9	11.0	179.0	32.86
	Инфракрасный В5	25.2	4.0	115.0	4.56
	Инфракрасный В7	12.0	1.0	75.0	2.63
	Температура °С	-2.3	-9.8	-0.2	0.73

Таблица 2. Факторные нагрузки переменных в четырехмерном пространстве (метод главных компонент с ротацией), жирным шрифтом выделены нагрузки >0.7

Год	Каналы	Компонента 1	Компонента 2	Компонента 3	Компонента 4
1986	B1	0.853	0.156	0.393	0.300
	B2	0.846	0.153	0.408	0.304
	B3	0.850	0.159	0.405	0.297
	B4	0.864	0.161	0.378	0.283
	B5	-0.533	0.038	-0.326	-0.748
	B7	-0.358	0.099	-0.238	-0.882
	2010	B1	0.350	0.161	0.897
B2		0.351	0.141	0.902	0.200
B3		0.353	0.151	0.901	0.197
B4		0.353	0.178	0.891	0.203
B5		0.128	0.959	0.076	-0.060
B7		0.140	0.922	0.262	-0.015
Описанная дисперсия		3.855	1.980	4.088	1.852
Вклад компоненты В описание варьирования в%		0.321	0.165	0.341	0.154

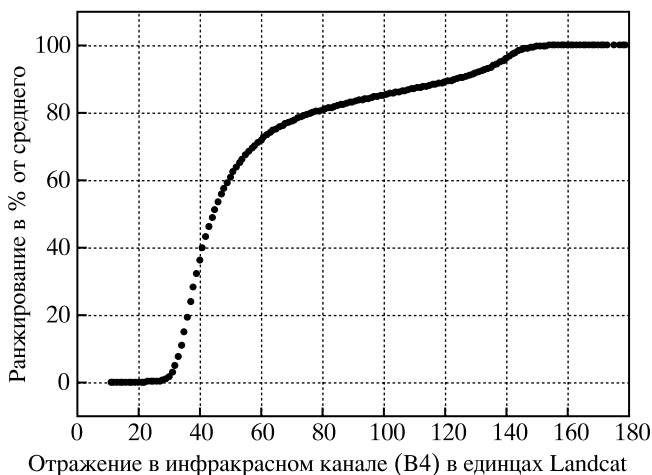


Рис. 1. Преобразование значений канала методом ранжирования в процентах от среднего.

каналов, отражающих содержание влаги к визуальным и ближним инфракрасным каналам, связь содержания влаги с температурой делает целесообразным исключить эти два канала (5-й и 7-й) из анализа как отображающие процессы существенно независимые от состояния собственно растительного покрова. С другой стороны, относительная ортогональность каналов 2010 г. к 1986 г. указывает на существенность происшедших изменений в пространственной структуре отражения солнечной энергии. Линейная корреляция между каналами сравниваемых сроков 0.72–0.75, корреляция Спирмена 0.7–0.74.

Для снижения влияния локальных условий погоды, каналы ранжируются в процентах в програм-

ме Statistica 8 (Ranks for ties: mean, fractional %). Результат такого преобразования показан на рис. 1, на котором выявляется, что чувствительность ранжированного канала в области очень низкого и очень высокого отражения практически равна нулю, но в области, начиная от 30 до 60 единиц отражения Landsat чувствительность к изменениям в единицах ранжирования существенно выше, чем в единицах Landsat. В результате изменения в этом диапазоне будут фиксироваться в ранжированной шкале более детально, чем по исходным данным. На рис. 2 сравнивается двухмерное отображение для ближнего инфракрасного канала (B4) и визуального красного канала (B3) изображений в единицах Landsat и единицах ранжирования. В ранжированных данных каналы в области 0–80% отражения существенно более независимы, чем в единицах Landsat и соответственно детали изменений в сравниваемых сценах более воспроизводимы.

Для облегчения интерпретации изменений представим основные характеристики растительного покрова: высоту леса, запас древесины, процент участия ели, мелколиственных и широколиственных пород по полевым измерениям с 2005 по 2010 г. для сцены в марте 2010 г. На рис. 3 показаны отличия по яркости безлесных и лесных территорий. Медианные значения отражения в трех каналах относительно близки и разность примерно в 50 единиц соответствует переходу от лесных территорий к безлесным и наоборот. Сопоставление высоты леса с отражением в четырех каналах (рис. 4) позволяет выделить четыре принципиально отличных состояния: безлесные

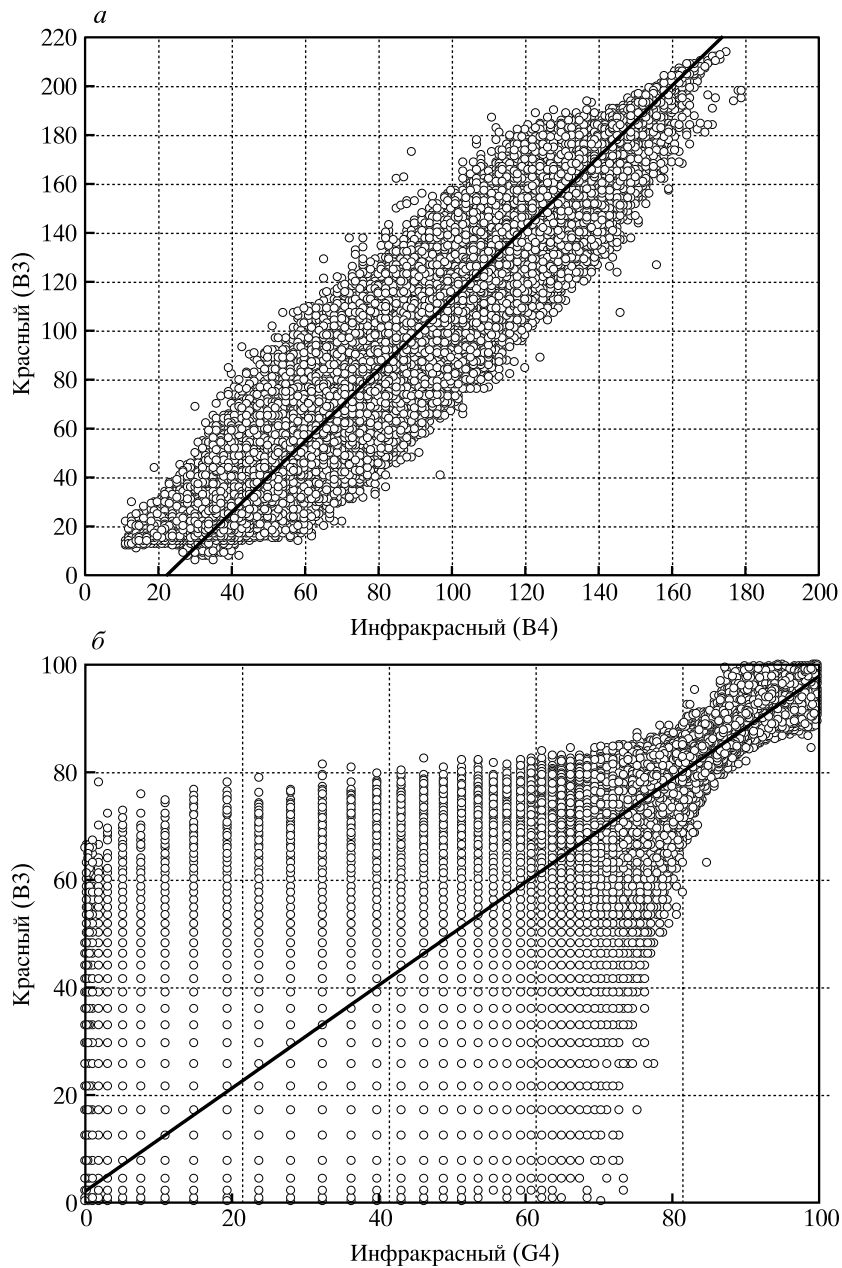


Рис. 2. Соотношение измерений в единицах Landsat (а) и единицах ранжирования (б) в двумерном пространстве ближнего инфракрасного и красного каналов.

территории со средним отражением около 70%, молодые леса с высотой до 12 м с отражением – 50–60%, леса с высотой от 14 до 25 м с отражением от 32 до 45%, леса с высотой 27–33 м – 25–30%. Перестойные леса с высотой больше 33 м отражают несколько больше, чем старые леса, что указывает на их естественный распад. Если первые три канала изменяются практически однозначно, то инфракрасный канал в молодых лесах отражает больше, чем все остальные, а в старых, напротив, его отражение минимально. На рис. 5 приведена аналогичная связь отраже-

ния в каналах с запасом древесины. Как следует из рисунка, зависимость сильно нелинейна, в результате чего состояния с большими запасами слабо отличаются по отражению, но смысл связи такой же, как и для высоты леса. Наконец, при большом участии в насаждении ели отражение в ближнем инфракрасном канале (B4) минимально, а большое участие мелколиственных пород определяет относительно высокое отражение (рис. 6). Это соотношение объясняет снижение отражения в ближнем инфракрасном канале в старых лесах в сравнении с молодыми и позволяет идентифи-

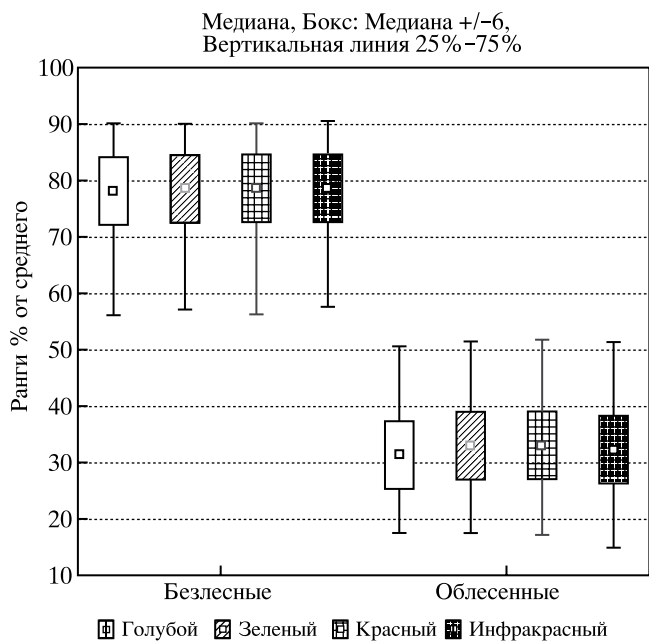


Рис. 3. Отражение безлесной и облесенной поверхности в марте 2010 г. по полевым данным за 2005–2010 гг. (медианный тест).

цировать увеличение участия ели в древесном пологе. В целом же рассмотренные соотношения позволяют, по крайней мере, на качественном уровне оценивать смысл измеряемых изменений состояния ландшафтного покрова. В силу большой нелинейности отношений построение регрессионной модели довольно сложно и обеспечивает описание варьирования свойств растительности от яркости в каналах для марта с коэффициентом детерминации около 40%.

Результаты анализа. На рис. 7 приведены гистограммы распределения разностей между одноименными каналами за два срока, а в табл. 3 статистические параметры распределения. Распределения для всех каналов, кроме инфракрасного, практически симметричны, но с положительным эксцессом, что указывает на превышение частоты малых разностей, то есть неизменившихся участков растительности относительно модели нормального распределения. Вместе с тем, в целом доля участков трансформированной растительности близка к доле восстановившейся растительности (рис. 7).

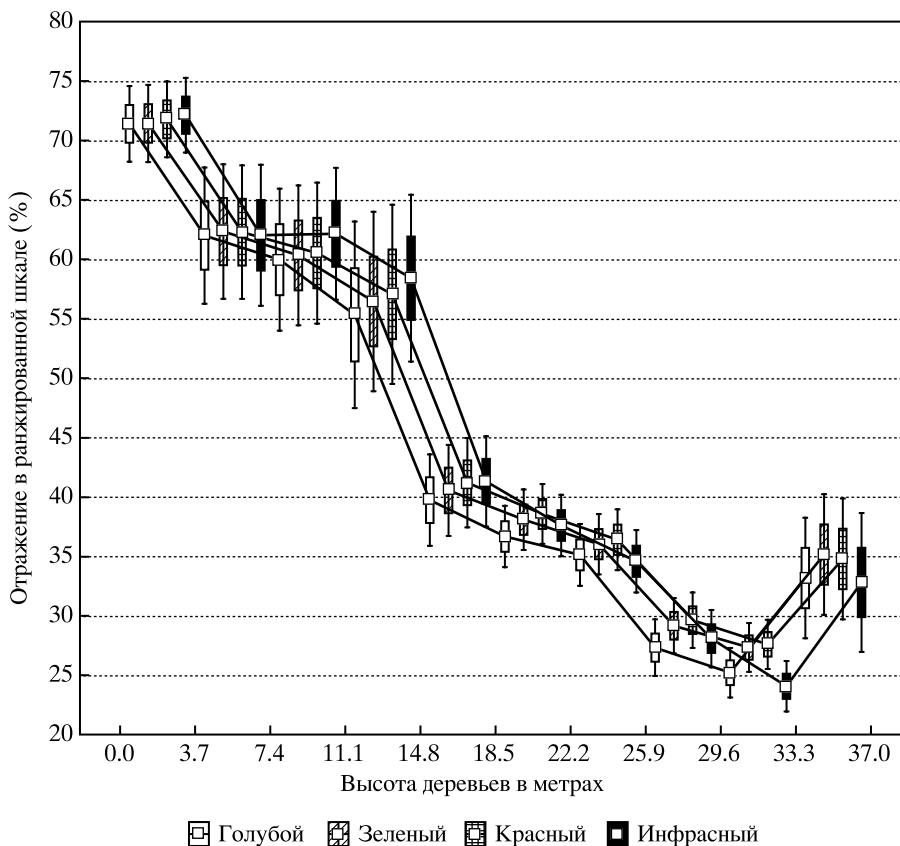


Рис. 4. Связь отражения в марте 2010 г. с высотой леса. (точка – среднее, бокс – одна среднеквадратическая ошибка, вертикальная линия – две ошибки).



Рис. 5. Связь отражения в марте 2010 г. с запасом древесины. (точка – среднее, вертикальная линия – две среднеквадратические ошибки).

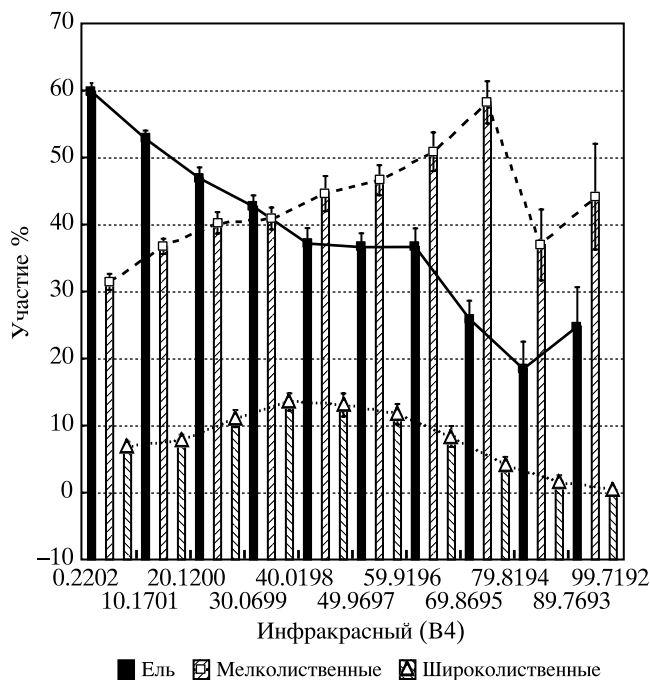


Рис. 6. Связь отражения в марте 2010 г. с долей участия породы (точка – среднее, вертикальная линия – две среднеквадратические ошибки).

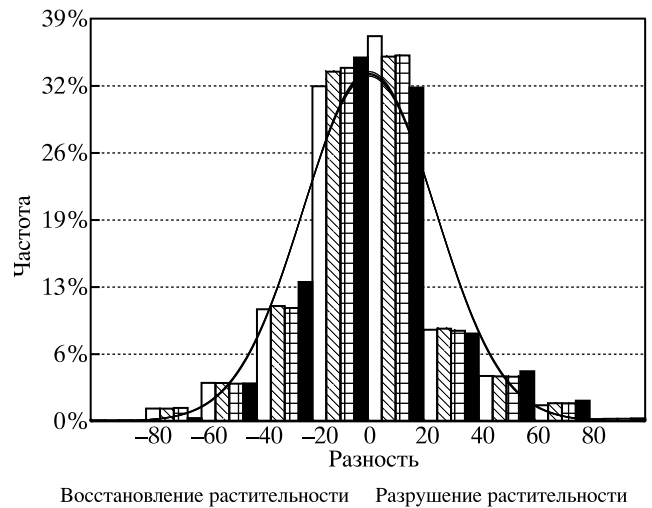


Рис. 7. Распределение разностей ранжированных яркостей между изображениями в марте 2010 и 1986 гг.

Таблица 3. Статистические параметры распределения разностей

Каналы	Среднее	Среднее квадратическое	Асимметрия	Экссесс
Голубой (B1)	0.000	23.7	0.167	1.41
Зеленый (B2)	-0.000	24.0	0.211	1.37
Красный (B3)	-0.000	23.9	0.196	1.48
Ближний	-0.000	23.8	0.560	1.09
Инфракрасный (B4)				

Таблица 4. Факторные нагрузки переменных в двухмерном пространстве (метод главных компонент с ротацией, жирным шрифтом выделены нагрузки >0.7)

Каналы	Первая компонента	Вторая компонента
Голубой (B1)	0.825	0.555
Зеленый (B2)	0.808	0.580
Красный (B3)	0.809	0.579
Ближний	0.572	0.820
Инфракрасный (B4)		
Описанная дисперсия	2.315	1.652
Вклад компоненты описания варьирования в%	0.579	0.413

Используя метод главных компонент, получаем, что две компоненты описывают четыре переменных разности сцен по каналам 99.1% варьирования и видимая часть спектра относительно независима от инфракрасной (табл. 4).

Очевидно, что вторая компонента отражает вклад в динамику хвойных пород и в первую очередь ели, для которых характерно относительно низкое значение отражения в инфракрасном канале.

При оценке изменений всегда стоит проблема выбора порога: какое значение разности можно считать наиболее значимым? Эту техническую проблему удобно решать на основе дихотомической классификации по процедуре К-средних. Такая классификация, почти наверное, найдет в континууме многомерного множества область границы, на которую приходится минимум наблюдений. Проверить качество классификации и статистическую значимость выделенных классов можно, используя дискриминантный анализ (табл. 5). Как следует из материалов таблицы, неопределенность воспроизведения каждого класса классификации значениями разностей при гипотезе нормальности распределения, используемой в дискриминантном анализе, очень низкая и классам можно поставить в соответствие масштаб и характер изменения. Так как все визуальные кана-

лы изменяются подобно, то для трактовки смысла каждого класса достаточно рассмотреть разности по красному и инфракрасному каналу. Очевидно, что не изменившийся за 24 года растительный покров соответствует шестому классу, охватывающему 20.263% территории. Нулевому классу соответствует наиболее существенное восстановление леса от практически полностью безлесной территории (вырубки с лесом до высоты 4 м) до сомкнутого леса с высотой более 25 м. Так как разность по инфракрасному каналу, меньше чем по красному, то восстановление произошло в основном за счет мелколиственных пород. Первому классу соответствует тот же тип восстановления, но с меньшей высотой и запасом. Второй класс дает тот же тип изменения в трех вариантах: слабое восстановление от вырубки или переход из молодых лесов в средневозрастные или из средневозрастных в старые. В третьем классе изменения подобны второму, но соответственно заметно меньшие. В четвертом и пятом классах разница в инфракрасном канале больше, чем в красном, что указывает на увеличение роли ели. Так как это возможно только при смене мелколиственных лесов еловыми, или развитием елового возобновления под пологом лиственных пород, то общий масштаб изменения здесь не велик. Пятому классу соответствует такое же по типу, но еще меньшее изменение. Таким образом, первые четыре класса могут быть определены как “восстановление от мелколиственных лесов” с подразделениями “значительное”, “среднее”, “умеренное” и “незначительное”, а четвертый и пятый к смене мелколиственных лесов еловыми. Два последних класса охватывают 23.3% территории, а восстановленные мелколиственные леса 18.7%.

Положительные разности (7–15-й классы) указывают на разрушение древесного полога. В 7-м и 8-м классе незначительные потери запаса происходят в первую очередь за счет лиственных пород. В остальных классах разность в инфракрасном канале больше, чем в красном, что указывает на общее разрушение с уменьшением доли хвойных пород. Полному уничтожению древесной

Таблица 5. Вероятность (в процентах) отнесения к классу состояния изменения растительного покрова по разностям четырех каналов между сценами марта 2010 и марта 1986 года.

	Разность		Воспроизведение класса (%)													Изменение (%) в целом			
	Красный	Инфра-красный	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		13	14	15
0			97.23	2.77	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.802
1	-65.75	-50.22	0.53	95.94	3.53	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.388
2	-31.97	-30.77	0.00	0.37	96.16	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.367
3	-21.17	-22.16	0.00	0.00	0.28	95.3	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.109
4	-12.64	-14.57	0.00	0.00	0.00	0.1	96.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.158
5	-5.82	-7.15	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	95.6	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.210
6	0.72	-0.12	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	99.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.263
7	7.06	6.25	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	5.7	94.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.735
8	14.24	11.12	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	8.7	89.29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.509
9	17.64	21.18	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	8.39	1.88	1.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.199
10	25.32	26.46	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.77	98.20	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	3.291
11	32.52	34.02	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	2.24	97.76	0.00	0.00	0.00	0.00	2.793
12	40.91	42.79	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	3.49	96.49	0.02	0.00	0.00	2.549
13	50.59	52.50	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	1.52	98.48	0.00	0.00	2.122
14	62.14	63.68	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	3.73	96.27	0.00	1.724
15	77.22	78.35	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.56	96.44	0.780

растительности соответствует 15-й и 14-й классы. Остальные классы от 13-го до 9-го отражают различные масштабы разрушения. Можно ввести следующую условную шкалу: полное уничтожение – 15-й класс, практически полное – 14-й, очень сильное повреждение – 13-й, сильное – 12-й, среднее – 11-й, слабое – 10-й и очень слабое – 9-й. Разрушения с увеличением участия ели составляют 20% и разрушения выше слабого 13.26%.

На рис. 8 приведена общая схема изменения растительного покрова. Тона темнее серого (болота – 7) отражают различные масштабы нарушений. Наиболее четко выделяются свежие вырубki в охранной зоне и гарь в центре заповедника. Ветровал 1996 г. выделяется как очень сильное нарушение, а ветровал 1987 г. как сильное. Лес на ветровалах хорошо восстанавливается. К 2010 г. на месте ветровалов распространены молодые леса различной сомкнутости с высотой 5–6 м, а на ветровалах 1987 г. уже с высотами около 10–12 м. На рис. 8 хорошо выделяются умеренные нарушения вдоль речек и ручьев, маркирующие результаты деятельности бобров. Весьма характерны темные контуры вокруг болот и на самих болотах (серые контура маркируют неизменное состояние), выделяющие разрушение сосновых и других лесов вокруг болот (процессы заболачивания) и на самих болотах. Наиболее светлые тона маркирует восстановление лесов на старых лесосеках. Собственно территория ядра заповедника характеризуется мозаикой светлых и темных тонов на фоне серого, воспроизводящих процессы естественной динамики еловых южно-таежных лесов. Наряду с этим выделяются светлые линейные структуры, маркирующие восстановление коренного леса на старых ветровалах, по сопоставлению с тоном восстановления на вырубках, произошедших в 50-х годах прошлого века. При всех этих изменениях для всей рассматриваемой территории существует практически полный баланс восстановления растительного покрова и его разрушения. Фактически тот же баланс существует и для заповедника и охранной зоны (рис. 7) В заповеднике несколько больше доля восстанавливающихся лесов 45.3% против 41.3% в охранной зоне.

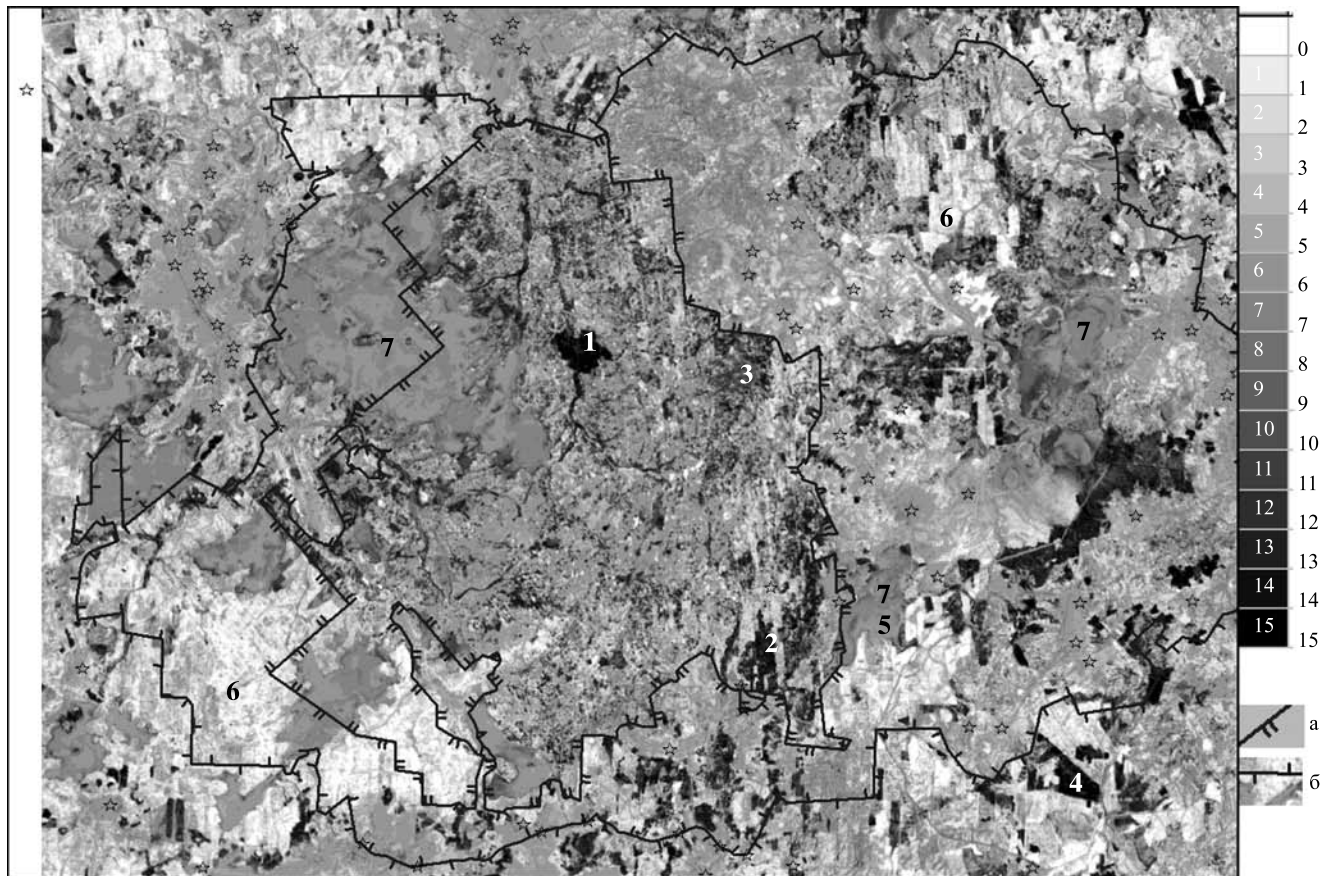


Рис. 8. Восстановление мелколиственных пород: 0 – значительное (полное), 1 – среднее (почти полное), 2 – умеренное, 3 – незначительное; смена мелколиственных пород елью: 4 – умеренное, 5 – слабое; 6 – отсутствие изменений; разрушение редкостойных сосновых лесов на болотах и/или разрушение старых лиственных лесов с увеличением доли участия ели: 7 – слабое, 8 – умеренное; разрежение лесов: 9 – очень слабое, 10 – слабое, 11 – среднее, 12 – сильное, 13 – очень сильное, 14 – почти полное уничтожение, 15 – полное уничтожение.

Цифры на карте 1 – гарь (полное уничтожение), 2 – ветровал 1996 г. – почти полное уничтожение, очень сильное нарушение, 3 – ветровал 1987 г. – очень сильное, сильное, среднее нарушение, 4 – вырубki 2000–2010 гг. – полное уничтожение. 6 – вырубki 1970–1986 гг. – полное и почти полное восстановление, 7 – нет изменений (верховое болото). а – граница заповедника, б – граница охранной зоны.

Более детально характер изменений можно показать на основе классификации по значениям каналов двух сравниваемых сроков. На этой основе по значениям яркости можно выделить группу мелколиственно-еловых лесов, мелколиственных лесов и, с дополнением классификации по сценам 2007 г., болота и открытые территории (селища и луга).

В табл. 6 приведены оценки изменения состояния растительности мелколиственно-еловых лесов за 24 года. Эти в основном старые и приспевающие леса в 1986 г. занимали в заповеднике 59.7% в охранной зоне 19.4% и в целом 25.9% от всей территории. В рассматриваемую группу лесов входит два варианта: практически чистые еловые леса с очень малой примесью мелколиственных пород и мелколиственно-еловые леса. Все они в 1986 г. были старыми или перестойными.

Только 21.3% этих лесов осталось неизменным, а 19.1% увеличили запасы и перешли в статус еловых лесов. Эти два слабо изменившихся варианта равномерно и в основном достаточно крупными гомогенными контурами распространены по всему ареалу еловых лесов. Характер размещения восстанавливающихся лесов позволяет связывать их с очень старыми ветровалами. Дисперсно по территории распространены лиственно-еловые леса, претерпевшие слабый распад в большей степени за счет выпадения лиственных пород (14.6%). Лиственно-еловые и еловые леса, полностью разрушенные, занимают 18.8% от рассматриваемой территории. Это результат верхового пожара (контур 1 на рис. 8), ветровала 1996 г. (2), 1987 г. (3), вырубki (4), деятельности бобров по долинам рек. В настоящее время гарь (пожар 1998 г.) в основном заросла вейником, ивой и по

Таблица 6. Изменения состояния хвойных лесов с марта 1986 по март 2010 г.

Класс	Состояние в 1986 г.	Каналы (1986)		Преобразование	Каналы (2010)		Разность		Процент участия		
		Красный	Инфракрасный		Красный	Инфракрасный	Красный	Инфракрасный	Заповедник	Охранная зона	В целом
1	Лиственново-еловый	15.5	17.8	Развитие	10.7	12.1	-4.8	-3.6	10.8	18.6	19.1
2	Еловый	5.4	7.3	Стабильно	7.5	9.1	2.4	3.8	17.7	18.4	21.3
3	Лиственново-еловый	16.3	16.1	Слабый распад	25.5	22.8	8.9	6.4	8.8	13.8	14.6
4	Еловый	8.1	8.6	Сильный распад	32.7	36.5	24.6	28.5	7.8	10.6	10.4
5	Лиственново-еловый	19.0	17.8	Сильный распад	45.8	47.1	26.7	27.9	8.4	16.1	15.9
6	Еловый	9.3	8.9	Уничтожение	63.5	66.0	54.3	56.8	2.8	10.7	8.3
7	Лиственново-еловый	18.3	16.8	Уничтожение	76.0	77.0	57.7	58.7	1.9	11.7	10.5

краям осинниками высотой до 2–3 м. На месте ветровала 1996 г. в основном распространено возобновление из осины, березы, рябины, клена, вяза обычно с участием ели, с различной сомкнутостью и высотой до 4–5 м. Вывалы 1987 г. в основном попадают в класс лиственново-еловых лесов, претерпевших сильный распад (15.9%). Сильный распад еловых лесов (10.4%) так же в основном связан с ветровалами 1987 г., но с более интенсивным восстановлением древесного яруса (высота до 18 м). Этот класс частично также определяется процессами естественного распада перестойных лесов. Таким образом, в целом старые еловые леса потеряли в заповеднике 20.87% и 49.14% в охранной зоне (в результате рубок 22.4%).

Состояния растительного покрова, вошедшие в класс мелколиственных лесов и вырубкам занимали в 1986 г. в заповеднике 32.16%, в охранной зоне – 71.58% и в целом для территории 68.2%. За 24 года все варианты этого типа в основном в той или иной степени демонстрировали сукцессионные смены к коренным лесам (табл. 7). Площадь безлесных территорий, исключая болота, за 24 года практически не изменилась и зарастание их кустарниками или мелколесьем, изменяющим отражение в марте в красном и инфракрасном каналах очень невелико. Почти безлесные вырубки в 1986 г. (рис. 8, контур б) восстановились до уровня приспевающих лесов и в первую очередь за счет лиственных пород. Такой большой прирост в рас-

сматриваемом районе способна обеспечить только осина. Следующий класс низкосомкнутых лиственных лесов за 24 года, напротив, практически не претерпел никаких изменений. Он гетерогенен по своему составу и занимает в лесном классе 45.5%. В него входят ольхово-березовые леса с хорошо развитым травяным ярусом на старопахотных землях в охранной зоне на севере рассматриваемой территории, вторичные березовые леса на месте старых вырубок на хорошо дренируемых участках моренных гряд, леса по долинам рек, черноольшаники и разреженные сосновые леса по окраинам болот. Если исключить в охранной зоне из этой категории леса на старопахотных землях, то эти сообщества в основном связаны с рубками, в то время как в заповеднике они приурочены преимущественно к долинам рек и сосновым лесам по окраинам болот. Молодые лиственные леса по старым рубкам и ветровалам в тех же участках сплошных вырубок перешли в средневозрастные и/или приспевающие мелколиственные леса с участием ели. Средневозрастные леса восстанавливаются с существенно разной скоростью. Леса на старых рубках и ветровалах, территориально связанные с рассмотренными выше рубками, восстановились до состояния спелых лиственново-еловых лесов. Два других класса средневозрастных лесов демонстрируют слабое и очень слабое увеличение высоты и запасов. В эту категорию входят собственно мелколиственные леса и относительно разреженные сосновые леса около болот и по долинам рек.

Таблица 7. Изменения мелколиственных лесов, вырубок и сельско-хозяйственных территорий с марта 1986 по март 2010 г.

Класс	Состояние в 1986 г.	Каналы (1986)		Преобразование	Каналы (2010)		Разность		Процент участия		
		Красный	Ин-фракрасный		Красный	Ин-фракрасный	Красный	Ин-фракрасный	Заповедник	Охранная зона	В целом
1	Открытые	88.5	88.4	Открытые Лиственные приспевающие	86.5	86.5	-2.1	-2.1	5.1	15.5	22.0
2	Вырубки с началом восстановле- ния	72.8	74.1		12.2	24.7	-60.5	-48.1	2.5	2.2	2.6
3	Низкосомну- тые леса	65.1	64.6	Практически неизменные Средневозра- стные-приспе- вающие	61.3	61.2	-3.8	-3.9	22.5	25.5	33.2
4	Молодые леса	58.5	59.7		26.2	25.8	-32.4	-32.7	2.1	3.6	4.5
5	Средневозра- стные леса	49.8	49.0	Очень слабое восстановление Елово- лиственные	45.5	41.8	-4.3	-7.9	9.1	6.6	9.3
6	Средневозра- стные леса	44.6	47.6		9.9	14.2	-34.5	-30.4	6.0	3.6	4.4
7	Средневозра- стные Приспеваю- щие леса	39.7	39.1	Слабое восста- новление Сильный распад	33.5	29.5	-6.3	-10.1	15.6	5.9	9.4
8	Приспеваю- щие леса	34.2	32.2		56.7	56.6	22.5	22.4	10.5	2.6	4.4
9	Приспеваю- щие леса	29.6	30.7	Лиственно- еловые	17.1	16.4	-12.5	-13.2	26.7	6.0	10.1

Относительно медленно развивающиеся мелколиственные леса связаны с наиболее дренированными территориями на моренных грядах и в меньшей степени с долинами рек. Значительная часть лесов, находившихся в 1986 г. в приспевающем состоянии, оказалась частично разреженной ветровалом 1996 г., а также по-видимому, процессами заболачивания и деятельностью бобров, но большая их часть перешла в спелую стадию мелколиственно-еловых лесов. Естественно, что таких лесов больше на территории заповедника, чем в охранной зоне, где они к 1986 г. были практически вырублены. Таким образом, в целом в заповеднике 22.2% средневозрастных и приспевающих лесов перешло в состояние близкое к климаксу, что составляет 7% от всей территории и частично компенсирует потери старых еловых лесов.

Верховые болота по оценке для 2007 г. занимают в заповеднике 9.7% от всей территории, в охранной зоне 9.3% и 6.96% для всей территории. (табл. 8). Открытые верховые болота без сосны в 1986 г. занимали в заповеднике только 83% от их современной площади. За 24 года типичные для

болот сосновые леса существенно разрушены и занимавшая ими территория по отражению весной в большинстве случаев приблизилась к открытому болоту. Степень усыхания болотной сосны конечно в разных участках различна, но их деградация не вызывает сомнения. Собственно масштабы латерального роста болот можно определить по полосе с гибелью древостоев по их границам. Оценить масштаб увеличения площади можно по рис. 9. Точный расчет латерального роста болота возможен, однако в данном случае ограничимся констатацией существенности в настоящее время процесса прогрессивного заболачивания.

Обсуждение результатов. Рассмотренные методы позволяют на основе мультиспектральной дистанционной информации с достаточной детальностью воссоздать процессы преобразования растительного покрова. Ограничения, накладываемые жанром статьи, позволяют показать лишь общую схему анализа в рамках мониторинга изменения растительного покрова. Применяя различные технические приемы можно не менее, чем в 2–3 раза повысить чувствительность анализа к реальным изменениям и ввести статистические

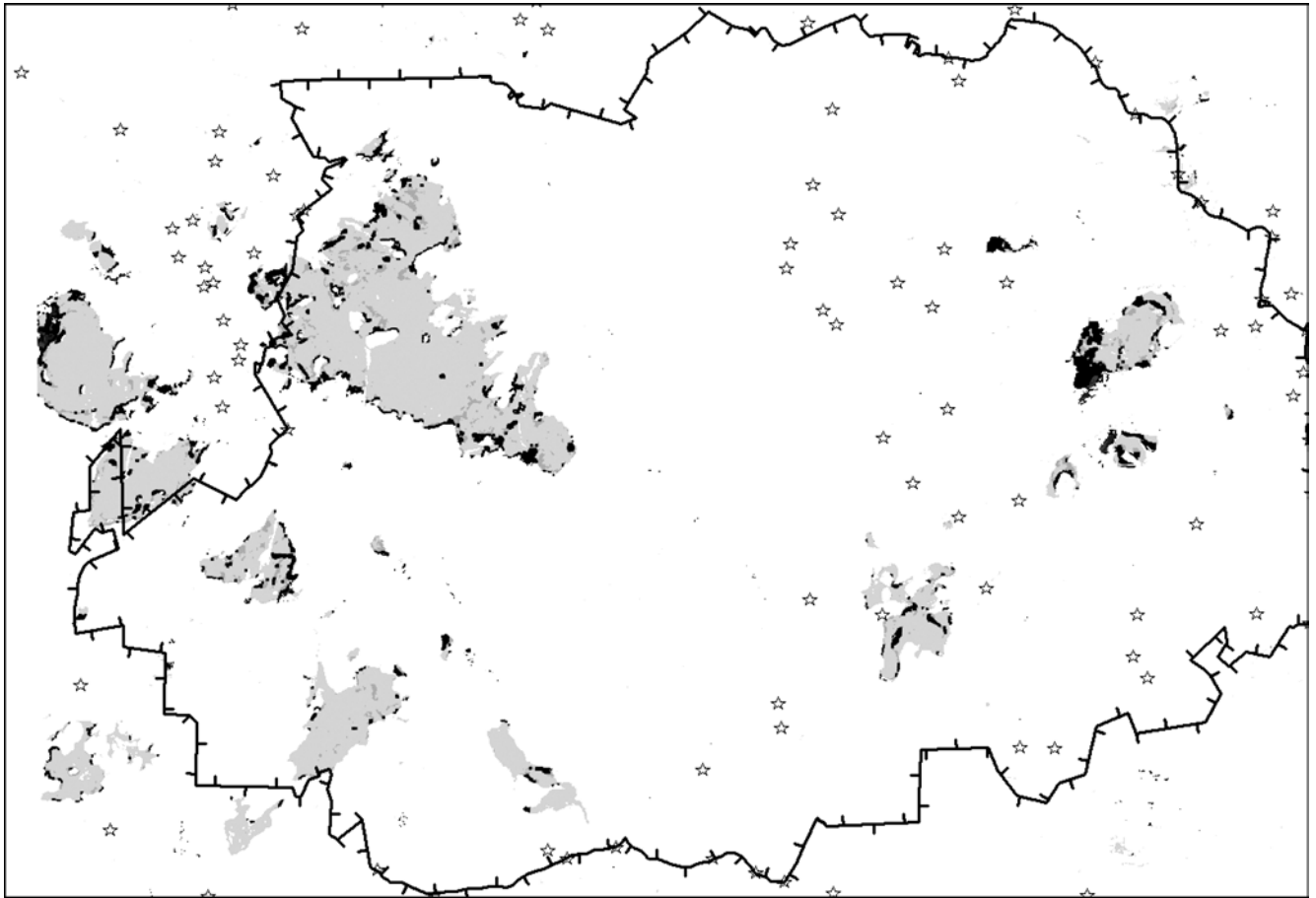


Рис. 9. Разрушение сосновых лесов на верховых болотах (черный тон – разрушенные сосновые леса).

оценки значимости различий. Существующие связи отражения с важнейшими свойствами растительного покрова позволяют интерпретировать измеренные изменения отражения солнечной радиации на языке естественных процессов. Так при всех катастрофических воздействиях на растительность таких факторов, как пожар, ветровалы, гари, деятельность бобров и процессы заболачивания, на заповедной территории, в общем, сохраняется баланс разрушения и восстановления коренного леса. Хотя *в настоящее время площадь участков с разрушенной растительностью все-таки несколько больше, чем с восстановившейся растительностью*. При этом значительный вклад в процесс разрушения вносит слабый дисперсный распад (гэп) перестойных коренных лесов. Так как ветровалам подвержены, прежде всего, старые и перестойные леса, то возникает естественная периодичность возникновения нарушений (10–20 лет) и сохраняется определенный баланс между разрушением лесов ветровалами и их восстановлением.

Восстановление лесов на вырубках в зависимости от условий произрастания может проходить

очень интенсивно и, напротив, весьма замедленно. На старопахотных землях могут формироваться своеобразные устойчивые низкопродуктивные ольхово-березовые травяные леса. По-видимому, хорошее развитие травяного яруса препятствует проникновению под полог ели и, возможно, тормозит рост мелколиственных пород. Сравнение восстановительных процессов в заповеднике и охранной зоне показывает, что успешное восстановление леса на вырубках, подобное таковому на ветровалах – относительно редкое явление. Чаше восстановление на промышленных вырубках происходит не столь эффективно, и леса надолго теряют свою лесопромышленную ценность. Имитация в лесном хозяйстве естественных процессов, наблюдаемых в заповеднике, скорее всего, способна заметно повысить продуктивность лесного хозяйства.

Наконец, особо следует отметить как характерную черту текущего периода высокую *интенсивность роста площади верховых болот, разреживание и гибель сосны, как по границам болота, так и на его основной поверхности*. Пря-

мые измерения на трансекте длиной 560 м через верховое болото с нивелировкой через 5 м показали средний вертикальный прирост поверхности болота составил 3 см за год и латеральное разрастание по просеке примерно 30 м за пять лет [6]. В целом столь же хорошо выражен процесс *разрушения еловых лесов соседствующих с верховым болотом*.

Полученные результаты показывают эффективность мониторинга состояния растительного покрова на основе дистанционной мультиспектральной информации среднего разрешения, однако можно полагать, что для различных физико-географических условий и вариантов динамики наибольшая эффективность может быть получена при применении других методов анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барталев С.А., Лупян Е.А.* 2005. Спутниковый мониторинг бореальных экосистем // *Природа*. 2005. № 9. С. 44–53.
2. Координация космической деятельности в системе Организации Объединенных Наций: направления деятельности и ожидаемые результаты на период 2012–2013 гг. – использование космических геопространственных данных в целях устойчивого развития // Докл. Ген. секретаря. Комитет по использованию космического пространства в мирных целях. 55 сессия. Вена, 6–15 июня 2012 г.
3. *Лабутина И.А., Балдина Е.А.* Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ: Метод. пос. М.: WWF России. Проект ПРООН/ГЭФ/МКИ “Сохранение биоразнообразия в российской части Алтае-Саянского экорегиона”. 2011.
4. *Пузаченко М.Ю.* Ландшафтная приуроченность ветровалов в Центральном-лесном заповеднике // *Тр. Центрально-лесного заповедника*. 2007. Вып. 4. Тула, 2007. С. 304–325.
5. *Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н.* Геоморфологическая история развития региона // *Комплексные исследования в Центральном-лесном государственном природном биосферном заповеднике: их прошлое, настоящее и будущее*. Матер. совещ. тр. Центрально-лесного заповедника. Вып. 4. Тула: Гриф и К, 2007.
6. *Пузаченко Ю.Г., Котлов И.П., Кренке А.Н., Сандлерский Р.Б.* Прямое измерение роста верхового болота // *Динамика многолетних процессов в экосистемах Центрально-лесного заповедника*. Тр. Центрально-лесного гос. природного биосферного заповедника. Вып. 5 / Под ред. Желтухина А.С. Великие Луки: Великолукская городская типография, 2012. С. 181–183.
7. *Пузаченко Ю.Г., Желтухин А.С., Козлов Д.Н., Кораблев Н.П. и др.* Центрально-лесной государственный природный биосферный заповедник. М.: Деловой мир, 2007. 80 с.
8. *Asner G.P., Braswell B.H., Schimel D.S., Wessman C.A.* *Ecolog. Res. Needs from Multiangle Remote Sensing Data // Remote Sensing Environ.* V. 63(2) / Elsevier Sci. Inc., 1998. P. 155–165.
9. *Coppin P.R., Bauer M.E.* Digital change-detection in forest ecosystems with remote sensing imagery // *Remote Sensing Rev.* 1995. V. 13. P. 207–234.
10. *Coppin P., Jonckheere I., Nackaerts K., Muys P., Lambin E.* Digital Change Detection in Ecosystem Monitoring: a review // *Int. J. Remote Sensing* V. 25(9). 2004. P. 1565–1596.
11. *Puzachenko M.Yu., Puzachenko Yu.G.* The multifunctional analysis of vegetation // *Man and environment in boreal forest zone: past, present and future*. Int. Conf., July 24–29, 2008. Central Forest State Natural Biosphere Reserve, Russia / Eds. Novenko E.Yu., Spasskaya I.I., Olchev A.V. In-te of Geography RAS, A.N. Severtsov In-te for Ecology and evolution RAS. Moscow, 2008. P. 83–98.
12. *Sepulcre-Canto G., Zarco-Tejada P.J., Jimenez-Berini J.A., Jimenez-Munoz J.C. et al.* Detecting crop irrigation status in orchard canopies with airborne and ASTER thermal imagery // *Geosci. Remote Sensing Sympos.*, 2007. IGARSS 2007. IEEE Int., 23–28 July 2007. P. 3643–3646.
13. *Skole D.L., Justice C.O., Townshend J.R.G., Janetos A.C.* A land cover change monitoring program: strategy for an international effort // *Mitigat. Adaptat. Strateg. Global Change*. 1997. V. 2. № 2. P. 157–175.

Analysis of changes of land cover using multispectral remote sensing information in the central forest reserve

Yu.G. Puzachenko¹, I.P. Kotlov², R.B. Sandlerkiy³

¹ *Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences*

² *Central Forest State Reserve. Nelidovskiy district, Tver oblast*

Vegetation cover changes are analyzed using data on differences in reflected solar radiation in spectral channels in two scenes of Landsat for March 1986 and March 2010, showing the balance between destruction and restoration of vegetation cover. Slight imbalance occurs as the result of the activity of beavers, leading to deforestation of floodplains of streams and small rivers. The differences in the rate of recovery of the forest clearings and the emergence of quasi-stable communities of small-leaved forests on previously cultivated lands, as well as the destruction of pine forests on bogs and forests adjacent to the bogs with an increase in the area of the bogs are shown.