

# МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ СЕРИЙ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАСШТАБОВ И ДИНАМИКИ ВЫРУБОК ТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ

С.А. Барталев<sup>1</sup>, Т.С. Курятникова<sup>1</sup>, Х.Ю. Стибиг<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт космических исследований (ИКИ) РАН,  
117997 Москва, Профсоюзная 84/32  
E-mail: beml@d902.iki.rssi.ru*

<sup>2</sup>*Объединенный научный центр Европейской Комиссии,  
I-21020 Ispra (VA), Italy  
E-mail: hans-urgen.stibig@jrc.it*

Вырубки лесов, являясь экономически значимым для России направлением лесопользования, в то же время представляют собой один из наиболее мощных факторов антропогенного воздействия на лесные экосистемы и оказывают непосредственное влияние на осуществление ими ряда важнейших биосферных функций, что диктует необходимость получения информации о масштабах и пространственно-временных характеристиках этого явления. Доступные в настоящее время архивы изображений со спутников серии Landsat открывают уникальную возможность получения достоверных данных о ретроспективной динамике лесов России под воздействием вырубок за последние десятилетия. В настоящей статье приводятся результаты исследования возможностей использования временных серий спутниковых изображений для оценки площадей вырубок лесов на тестовом участке в Республике Коми. Проводится анализ различных методов детектирования вырубок по разновременным изображениям и возможностей их потенциального применения для оценки долгосрочной динамики лесов России под воздействием вырубок на региональном и национальном уровнях.

## Введение

Леса России, являясь источником ценных сырьевых ресурсов для развития экономики страны, играют важнейшую биосферную роль, в значительной степени определяя характеристики глобальных биохимических и биофизических процессов в наземных экосистемах, атмосфере и гидросфере Земли [1]. Как динамическая экосистема, леса претерпевают крупномасштабные изменения под воздействием сложного комплекса возмущающих факторов природного и антропогенного характера. Вырубки, будучи одним из наиболее мощных антропогенных факторов воздействия на леса, влекут за собой множественные последствия экологического характера, проявляющиеся в изменении породно-возрастной структуры лесов, характеристиках цикла углерода, альбедо поверхности, гидрологического режима территории, условий обитания представителей лесной фауны, а также степени биологического разнообразия наземных экосистем [2]. Наличие регулярно обновляемой информации о масштабах и пространственно-временной динамике вырубок лесов является одним из необходимых условий устойчивого лесопользования и реализации условий Киотского протокола к Рамочной Конвенции ООН по изменению климата. При этом для эффективного управления лесными ресурсами и моделирования биосферных процессов необходимо иметь информацию не только о текущих изменениях в лесах, но и оценивать их динамику в исторической ретроспективе. В частности, ретроспективная информация о причинах и характере воздействий на леса является ключевой для оценки характеристик процессов лесовосстановления и сукцессионной динамики лесов, необходимой для управления лесными ресурсами и моделирования биосферных процессов.

Данные спутниковых наблюдений, и, в частности, изображения высокого пространственного разрешения со спутников серии Landsat являются эффективным инструментом мониторинга вырубок лесов [3]. Накопленные к настоящему времени и, в значительной мере находящиеся в открытом доступе [4] глобальные долгосрочные архивы данных Landsat, открывают уникальную возможность получения ретроспективных оценок вырубок лесов практически для всей территории России. Результаты выполненного исследования позволяют оценить возможности использования временных серий спутниковых данных высокого пространственного разрешения для долгосрочной оценки масштабов вырубок таежных лесов Европейского севера России.

## Методология выявления изменений в лесах по спутниковым данным

К настоящему времени разработан набор методов использования спутниковых изображений для выявления изменений в лесах, в том числе в результате вырубок, в основе которых лежит знание особенностей спектрального отражения различными компонентами лесных экосистем, а также связей между ти-

пами трансформаций лесного покрова и изменениями их спектрально-отражательных свойств [5-7]. При этом необходимо учитывать, что к различиям в спектрально-отражательных свойствах могут приводить и другие, не связанные с изменениями лесов факторы, такие как фенологическое состояние растительности, атмосферные условия, геометрические условия освещения и наблюдения, рельеф местности и некоторые иные особенности.

Все многообразие известных подходов к выявлению изменений в лесах с использованием данных спутниковых наблюдений основано на сопоставлении разновременной информации. Изображения могут выступать в качестве источника информации о состоянии лесного покрова в некоторые фиксированные отсчеты времени или сочетаться с другими пространственно-координированными данными о лесах, например, такими как цифровые карты или базы лесотаксационных данных в составе геоинформационной системы. В зависимости от типов сопоставляемых разновременных данных методы анализа спутниковых изображений имеют существенные отличительные особенности.

Представленная на рисунке 1 схема, при достаточно высоком уровне общности по отношению к возможным конкретным методам обработки спутниковых данных, отражает основные идеи, заложенные в методологию выявления изменений в лесах, в основу которой положена тесная интеграция спутниковых изображений и банка данных геоинформационной системы.

При этом спутниковые изображения могут быть представлены как одиночными, так и разновременными данными спутниковой съемки исследуемой территории, а банк данных представляет собой организованную совокупность цифровых карт и вспомогательных данных, формируемых, как правило, по материалам лесоустройства. В состав банка данных может также включаться цифровая модель рельефа.

Методологией выявления изменений в лесах по спутниковым изображениям предусмотрено последовательное выполнение ряда этапов, среди которых можно выделить следующие:

- предварительная обработка изображений;
- выявление и интерпретация изменений в лесах на основе информативных признаков;
- постобработка результатов выявления изменений;
- актуализация банка данных ГИС о лесах.

Рассмотрим более детально содержание указанных выше этапов.

#### *Предварительная обработка спутниковых изображений*

Необходимым этапом, предшествующим тематическому анализу данных, является их предварительная обработка, включающая в себя главным образом геометрическую и радиометрическую коррекцию спутниковых изображений.

Геометрическая коррекция предполагает взаимное пространственное совмещение разновременных спутниковых изображений, а также их преобразование в одну из стандартных картографических проекций. Пространственная привязка изображений выполняется с использованием данных о навигационных элементах спутников, вычисляемых по известному времени съемки с использованием соответствующих моделей орбиты. Уточнение пространственной привязки осуществляется на основе формирования сети опорных точек и трансформирования изображения в систему координат базовой карты. Трансформирование выполняется на основе линейных или нелинейных преобразований в зависимости от различий геометрических моделей исходных изображений, числа опорных точек и требуемой точности пространственной привязки. В случае существенных перепадов высот обследуемой территории и доступности цифровой модели рельефа на этапе геометрической коррекции также выполняется компенсация искажений изображения, связанных с влиянием этого фактора.

Необходимость выполнения этапа радиометрической коррекции, а также его содержание находится в существенной зависимости от методики последующего тематического анализа данных и может включать в себя следующие процедуры:

- коррекция влияния положения Солнца и геометрических условий наблюдения;
- коррекция влияния атмосферных условий;
- коррекция влияния рельефа местности;
- взаимная нормализация разновременных изображений для интегральной компенсации влияния различий в характеристиках сенсора, состоянии атмосферы, фенологическом развитии растительности и других факторов.

Предварительная обработка изображений в общем случае предполагает использование банка данных ГИС для выполнения как геометрической, так и радиометрической коррекции. При этом необходимо учитывать целесообразность использования информации о лесных насаждениях и других категориях земель для радиометрической коррекции изображений, предполагающей знание коэффициентов моделей двунаправленного отражения, зависящих от характеристик наблюдаемых объектов. Учет данных о категориях земель, а также информации о породной структуре лесных насаждений может быть использован

при взаимной нормализации разновременных спутниковых изображений, полученных в различные периоды фенологического состояния лесной растительности.

### *Тематический анализ спутниковых изображений для выявления изменений в лесах*

Выявление и интерпретация изменений в лесах по спутниковым изображениям предполагает выполнение комплекса процедур, представленных следующей последовательностью действий:

- формирование информативного признакового описания (по изображению);
- выделение областей интереса на изображении;
- детектирование изменений в лесах с помощью информативных признаков;
- классификация/интерпретация изменений в лесах.

Под информативными признаками понимаются признаки, полученные по предварительно преобразованным в спектральном или пространственном отношении, или тематически обработанным спутниковым изображениям. Информативные признаки должны в наилучшей мере отвечать задаче детектирования изменений в соответствии с априорно известными их видами, типами данных наблюдений и алгоритмами их анализа. Формирование признакового описания зависит от начальных данных и специфики задачи: доступности одномоментных или разновременных спутниковых изображений, уровня согласованности типов разновременных изображений и условий их получения, видов подлежащих выявлению изменений лесов и используемых методов их детектирования. Таблица 1 отражает попытку систематизации существующих представлений о наиболее распространенных типах информативных признаков и, согласованных с ними, приоритетных методов детектирования изменений в лесах при различных вариантах доступных разновременных данных.

Этап выделения областей интереса на изображении выполняется с использованием банка данных ГИС и предназначен для ограничения на изображении однородных участков с заданными свойствами, например принадлежащих некоторым категориям земель или насаждениям с соответствующими таксационными характеристиками. Значимость этого этапа существенно варьирует в зависимости от используемой техники детектирования изменений. Так, в частности, он может быть отнесен к числу ключевых процедур при выявлении изменений в лесах по аномальным значениям информативных признаков при использовании одномоментных изображений и, носит вспомогательный характер в алгоритмах, основанных на анализе разновременных спутниковых данных.

Набор начальных данных определяет не только формирование набора информативных признаков, но и технику последующего анализа данных. Не останавливаясь на детальном анализе представленных в таблице 1 подходов, заметим, что наиболее широкий арсенал методов может быть использован при выявлении изменений по разновременным спутниковым изображениям, полученным одним типом сенсора в сходных условиях съемки. Кроме того, использование такой комбинации данных наиболее эффективно с точки зрения разнообразия выявляемых изменений, возможности детектирования участков незначительных изменений и интерпретации качественных и количественных преобразований характеристик лесов.

Этап классификации/интерпретации изменений в лесах по информативным признакам направлен на определение типов выявляемых изменений, а также фильтрацию аномалий, не связанных с реальными изменениями в лесах. В зависимости от методов анализа данных к появлению последних могут приводить различные факторы, в частности, такие как:

- различия в атмосферных условиях, влияние которых не устраняется при предварительной обработке данных (например, в результате наличия облачности);
- изменения характеристик состояния лесов, не связанных с трансформацией насаждений (например, различия фенологического состояния или влажности покрова);
- остаточные ошибки пространственного совмещения разновременных спутниковых изображений и цифровых карт лесов.

На этом этапе происходит интерпретация полученных изменений, которая осуществляется на основе экспертного анализа с использованием банка данных ГИС и опорных спектральных сигнатур для того, чтобы ограничить область тематического интереса и сфокусироваться на изменениях, интересующих исследователя в рамках решаемой задачи. Этап постобработки результатов анализа изображений, предназначенный для подготовки заключительного информационного продукта и его включения в банк данных ГИС, часто включает в себя фильтрацию небольших по площади и не подлежащих картографическому отображению участков изменений в лесах.

Таблица 1. Информативные признаки и приоритетные методы выявления изменений в лесах в зависимости от доступных данных

Типы признаков	Приоритетные методы выявления изменений		
	Разновременные изображения, полученные		Одиночные изображения в сочетании с базой данных ГИС о лесах
	сенсором одного типа в близких условиях	различными сенсорами или при различных условиях	
<p><b>исходные изображения</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• спектральные яркости;</li> </ul> <p><b>...или признаки, основанные на спектральных преобразованиях изображений</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• спектральные индексы;</li> <li>• главные компоненты;</li> </ul> <p><b>...или признаки, основанные на пространственно-яркостных преобразованиях изображений</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• морфологические признаки;</li> <li>• текстурные признаки;</li> </ul> <p><b>...или признаки, основанные на тематическом анализе изображений</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• результаты классификации;</li> <li>• результаты декомпозиции спектральных смесей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• анализ векторов изменений по разностям информативных признаков;</li> <li>• совместная классификация разновременных изображений;</li> <li>• сопоставление результатов независимого тематического анализа разновременных изображений;</li> <li>• визуальное обнаружение контрастных участков с использованием цветового синтеза разновременных изображений</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• сопоставление результатов независимого тематического анализа разновременных изображений;</li> <li>• совместная классификация разновременных изображений</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• выявление аномальных значений информативных признаков на участках гипотетически однородных лесных насаждений;</li> <li>• сопоставление результатов тематической обработки изображений с цифровыми картами лесов</li> </ul>

### Эксперименты по детектированию вырубок в лесах по разновременным спутниковым изображениям

Масштабы вырубок в лесах России, их характеристики и временная динамика в значительной мере различаются в различных регионах, что определяется целым рядом природных и социально-экономических условий, в частности, таких как, лесистость территории, породно-возрастная структура насаждений, уровень развития инфраструктуры региона, наличие административных и законодательных ограничений лесопользования. Леса Европейского Севера России, обладающие значительными запасами экономически ценных хвойных лесов (главным образом сосны и ели), подвергаются интенсивным сплошнолесосечным рубкам [1], что в частности привело к замене на значительных территориях старовозрастных темнохвойных лесов вторичными лиственными насаждениями. Согласно существующим правилам рубок площади вырубок в лесах региона могут достигать 50 га, хотя до начала 90-х годов прошлого столетия допускались вырубки размером до 200 га [8-10]. В последние годы наряду с доминирующими в регионе сплошными рубками, появилась, сохраняющаяся до настоящего времени, тенденция увеличения доли выборочных рубок лесов, что отчасти сопряжено с нарастающей проблемой нелегального лесопользования.

Для проведения исследования был выбран тестовый участок на территории Междуреченского лесхоза Республики Коми площадью 958427 га и лесистостью 87%, породная структура насаждений которого представлена в таблице 2.

Таблица 2. Распределение лесных насаждений тестового участка по преобладающим породам

Преобладающая порода	Доля лесных насаждений (%)	
	по площади	по запасу
Сосна	20.45	20.8
Ель	66.65	73.39
Береза	12.24	5.10

В качестве источника опорных данных о пространственном распределении типов лесных насаждений на тестовом участке была использована, полученная по данным последнего лесоустройства в 1998 году и преобразованная в цифровую форму карта-схема лесхоза масштаба 1:200 000.

Одной из предпосылок для ретроспективной оценки динамики лесов на больших территориях, послужившей стимулом для проведения исследований, является наличие долгосрочных архивов данных со спутников серии Landsat, открытых для свободного доступа в сети Internet в рамках программы Global Land Cover Facility [4]. Другие источники данных, позволяющие расширить временной диапазон наблюдений, также были использованы для формирования набора спутниковых изображений (таблица 3).

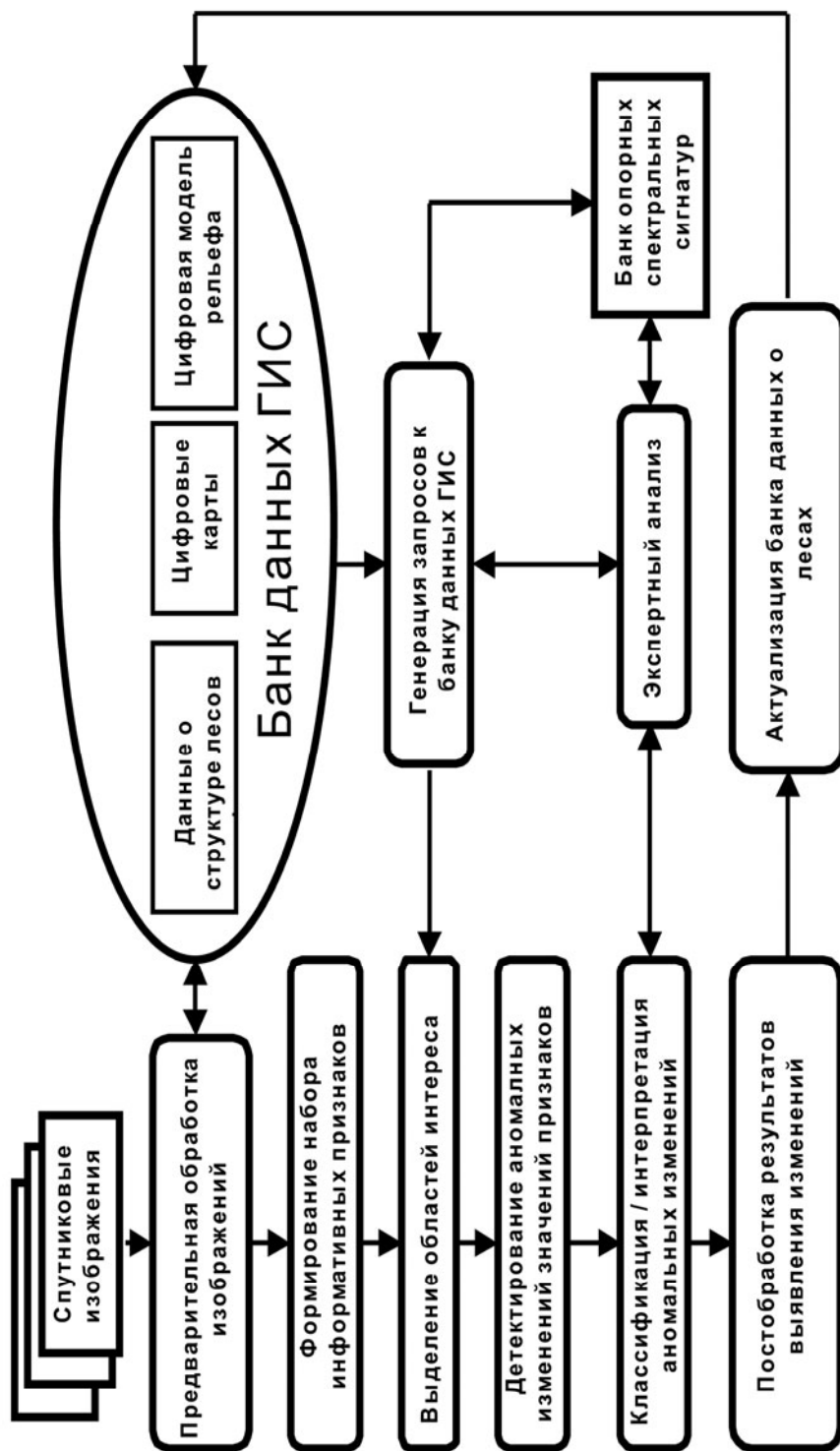


Рис.1. Логическая схема выявления изменений в лесах с использованием спутниковых изображений

Таблица 3. Характеристика экспериментального набора спутниковых данных

№	Дата съемки	Спутниковая система	Источник данных
1	03.08.1989	Landsat-TM	GLCF
2	01.06.1995	Landsat-TM	GLCF
3	11.07.2001	Landsat-ETM+	GLCF
4	06.06.2002	Landsat-ETM+	Eurimage
5	14.05.2003	Landsat-ETM+	USGS

**Примечания к таблице 2:**

GLCF - Global Land Cover Facility (проект Университета Мэриленд, США)

USGS – United States Geological Survey (Геологическая служба США)

Eurimage – компания по распространению спутниковых данные в Европе

Изображения были преобразованы в картографическую проекцию UTM и пространственно совмещены методом аффинных преобразований по опорным точкам с высоким уровнем точности. При этом среднеквадратическое расхождение координат опорных точек не выходило за пределы интервала 9-12 метров.

Исследования проводились с использованием трех описанных ниже методов детектирования вырубок по разновременным спутниковым изображениям, а именно:

- метода сравнения результатов независимой классификации лесов;
- метода поканальных разностей взаимно нормализованных изображений;
- метода покомпонентных разностей результатов декомпозиции спектральных смесей.

Метод сопоставления результатов независимого картографирования лесов по разновременным спутниковым изображениям основан на использовании одного из наиболее методически просто реализуемых подходов по выявлению изменений в лесах, позволяющих проводить однозначную интерпретацию изменений в рамках заданного набора тематических классов. К ограничениям данного подхода можно отнести его довольно низкую чувствительность к выявлению изменений переходного типа, таких как, деградация лесов в результате селективных вырубок, болезней и воздействия других факторов, не приводящих к полному исчезновению или гибели лесного покрова.

Для картографирования лесов применялся метод кластерного анализа изображений алгоритмом ERDAS-Isodata. При этом использовались нормализованные изображения Landsat-TM/ETM+ в спектральных каналах TM3, TM4 и TM5, а трехмерное пространство спектральных яркостей на первом этапе разбивалось на 100 кластеров. Процедура нормализации изображений была направлена на обеспечение равенства значений среднего и среднеквадратичного отклонения их гистограмм в различных спектральных каналах. Интерпретация кластеров в терминах типов лесного покрова осуществлялась на основе априорных знаний об их спектральных сигнатурах, а также использования имеющихся карт лесоустройства. Кластеры, которым в соответствие мог быть поставлен более чем один тематический класс и, следовательно, не допускающие однозначной тематической интерпретации, были дополнительно разбиты на большее количество семантических подкластеров с использованием указанного выше алгоритма. На завершающем этапе семантические кластеры одного типа объединялись в тематические классы. Описанный метод был использован для картографирования лесов и других типов наземного покрова по данным Landsat-TM (03.08.1989) и ETM+ (11.07.2001). Использованный при анализе изображений набор классов вместе с оценками их площадей по результатам картографирования представлены в таблице 4.

Результаты картографирования свидетельствуют о том, что на тестовом участке доминируют темнойвойные леса, а также присутствуют в различных пропорциях светлохвойные, смешанные и лиственные насаждения. Сравнение площадей лесов, относящихся к двум датам спутниковых наблюдений, позволяет оценить изменения лесистости территории, в том числе изменения в различных типах леса. Из полученных данных следует, что наибольшие изменения произошли в хвойных лесах, доля площади которых сократилась с 64,5% до 51,9% за период с 1989 года по 2001 год. В тоже время наблюдался рост доли смешанных насаждений в следствие сукцессионной смены породного состава лесов на вырубках предыдущих лет.

Метод поканальных разностей взаимно нормализованных изображений [5] был использован для детектирования вырубок в лесах тестового участка на основе независимого анализа следующих пар разновременных спутниковых изображений, а именно:

- TM (03.08.1989) и TM (01.07.1995);
- TM (01.07.1995) и ETM+ (11.07. 2001);
- ETM+ (11.07. 2001) и ETM+ (06.06.2002).

Указанный метод предполагает выполнение следующих этапов:

- (i) взаимная попарная нормализация одновременных спутниковых изображений;
- (ii) вычисление попиксельных разностей между парами одновременных изображений соответствующих спектральных каналов;
- (iii) тематическая интерпретация спектрально-яркостных разностей для выявления изменений в лесном покрове.

Таблица 4. Площади различных типов наземного покрова тестового участка по результатам картографирования с использованием спутниковых изображений

Тип наземного покрова	Краткое описание	Оценка площадей по результатам картографирования			
		3.08.1989		11.07.2001	
		км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%
Темнохвойные леса	Деревья пихты ( <i>Picea</i> ) и/или ели ( <i>Abies</i> ) составляют не менее 75% площади полога	4278,94	45,7	3704,23	39,7
Светлохвойные леса	Деревья сосны ( <i>Pinus</i> ) составляют не менее 75% площади полога	1761,21	18,8	1138,70	12,2
Лиственные леса	Деревья березы ( <i>Betula</i> ) или осины ( <i>Populus</i> ) составляют не менее 75% площади полога	522,642	5,6	543,85	5,8
Смешанные леса	Деревья хвойных и лиственных пород в площади полога составляют 25-75%	722,66	7,7	1295,25	13,9
Редкостойные леса	Насаждения с проективным покрытием менее 20%, в том числе на заболоченных территориях	29,56	0,3	79,15	0,9
Свежие вырубki	Вырубki менее чем 4-5 летней давности на момент наблюдения	327,63	3,5	74,67	0,8
Свежие гари	Гари менее чем 4-5 летней давности на момент наблюдения	4,94	0,1	251,71	2,7
Участки лесовозобновления	Возобновление лиственными породами деревьев с сомкнутостью более 80% на вырубках и гарях	1107,57	11,8	1774,72	19,2
Кустарниковая растительность	Участки с преобладанием лиственной кустарниковой растительности	78,41	0,8	32,94	0,4
Травяно-луговая растительность	Участки с преобладанием травяной растительности	82,29	0,9	33,77	0,4
Болота	Участки болот с преобладанием сфагновой растительности	207,59	2,2	199,24	2,1
<b>Все леса</b>		<b>7315,01</b>	<b>78,1</b>	<b>6761,18</b>	<b>72,5</b>

Взаимная нормализация одновременных спутниковых изображений преследует цель уменьшения радиометрических различий между изображениями, вызванных причинами, отличными от изменений в лесах, а именно различиями в состоянии атмосферы, положения Солнца, геометрических условий наблюдения и некоторых других факторов. Для проведения взаимной нормализации была использована линейная модель  $Img1 = a * Img2 + b$ , связывающая значения спектральных яркостей пары одновременных спутниковых изображений  $Img1$  и  $Img2$ , коэффициенты  $a$  и  $b$  которой оценивались методом линейного регрессионного анализа по множеству пикселей, с высокой вероятностью соответствующих неизменным участкам лесов. В качестве неизменных принимались пиксели, значения разности в которых не выходили за пределы стандартного отклонения от среднего, что допустимо в предположении нормального распределения разностей, а также площади изменений не превышающей 31,7% наблюдаемой территории. Вычисленные для неизменных участков леса коэффициенты корреляции (R) и линейной регрессии ((A,B) |  $y=Ax+B$ ) между парами спутниковых изображений представлены в таблице 5.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции и линейной регрессии между парами одновременных изображений

Пара спутниковых изображений	Спектральные каналы								
	TM3			TM4			TM5		
	R	A	B	R	A	B	R	A	B
TM,1989 & TM,1995	0,90	0,99	1,10	0,95	1,00	1,71	0,96	1,03	3,97
TM,1995 & ETM+, 2001	0,79	0,89	12,98	0,93	1,00	9,29	0,90	1,25	22,68
ETM+, 2001 & ETM+ 2002	0,82	1,01	5,13	0,89	0,66	12,16	0,93	1,06	1,94

В основе детектирования вырубок лежит использование различий между яркостью покрытой лесом территории и открытой почвы (или пионерской травяно-кустарниковой растительности) на вырубках в различных спектральных каналах сенсора. Кроме того, используется предположение, что при появлении вырубок в период между спутниковыми наблюдениями значения попиксельных разностей между парами раз-

новременных изображений должны значительно превышать различия между не изменившимися участками леса. При этом в качестве пороговых значений для выявления изменений в лесах были приняты два стандартных отклонения от среднего значения поканальных разностей между парами нормализованных изображений в каждом из спектральных каналов. Для исключения из рассмотрения изменений за пределами покрытой лесом территории была использована карт лесов, полученная по результатам классификации изображения Landsat-TM (03.08.1989). Каждому соответствующему изменениям пикселу был присвоен шестизначный код, отражающий рост, падение или отсутствие изменения яркости в различных спектральных каналах, использованный для последующего отделения вырубок лесов от других типов изменений. Полученные с использованием метода поканальных разностей изображений оценки площадей вырубок в различных типах лесов представлены в таблице 6.

Таблица 6. Площади вырубок лесов тестового участка, выявленные методом поканальных разностей разновременных спутниковых изображений

Тип леса	03.08.1989-01.07.1995		01.07.1995-11.07. 2001		11.07. 2001- 06.06.2002	
	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%
Темнохвойные	310,2	81,9	165,68	95,4	16,87	80,8
Светлохвойные	42,63	11,3	8,61	5,0	2,11	10,1
Лиственные	7,98	2,1	1,29	0,7	0,07	0,4
Смешанные	18,06	4,8	5,36	3,1	1,79	8,6
Редкостойные	0,00	0,0	0,03	0,0	0,04	0,2
<b>Все леса</b>	<b>378,86</b>	<b>100,0</b>	<b>173,67</b>	<b>100,0</b>	<b>20,87</b>	<b>100,0</b>

Метод покомпонентных разностей результатов декомпозиции спектральных смесей, основанный на использовании линейной модели спектрального смешения [11], был применен для выявления вырубок по спутниковым изображениям Landsat-ETM+ 2001 и 2002 годов. Результатом использования метода является оценка долей отдельных компонент в пикселах изображений, на основе решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N eps_i \rightarrow \min \\ R_i = \sum_{j=1}^M R_i^j S_j + eps_i \\ 1 = \sum_{j=1}^M S_j \end{cases}$$

где  $i$  – индекс спектрального канала спутникового сенсора ( $i=1, N$ ),  $j$  – индекс оцениваемой компоненты ( $j=1, M$ ),  $R_i$  – значение яркости произвольного пиксела в  $i$ -ом спектральном канале,  $R_i^j$  – значение яркости  $j$ -ой компоненты в  $i$ -ом спектральном канале,  $S_j$  – доля площади  $j$ -ой компоненты в пикселе;  $eps_i$  – погрешность измерения яркости в  $i$ -ом спектральном канале. Результат решения задачи минимизации  $\sum_{i=1}^N eps_i \rightarrow \min$  принимается в качестве оценки вектора долей компонент  $S_j$  в пикселе.

Выявление изменений в лесах с использованием метода декомпозиции спектральных смесей предполагает реализацию следующих шагов:

- (i) Выбор множества компонент и оценка значений их спектральных яркостей;
- (ii) Оценка содержания компонент в пикселях изображения;
- (iii) Построение покомпонентных разностей изображений;
- (iv) Выявление изменений по значениям покомпонентных разностей.

В данном случае пиксели изображений разлагались на три компоненты: хвойный лес, лиственный лес и открытая почва. В качестве оценок значений спектральных яркостей выбранных чистых компонент использовались их средние значения, полученные по маске соответствующего класса по результатам картографирования лесов по спутниковому изображению Landsat-ETM+ 2001 года. Применение данного подхода позволило выявить по разновременным спутниковым изображениям следующие типы изменений в лесах:

- Исчезновение лесов в результате сплошнолесосечных вырубок;
- Увеличение сомкнутости растительного покрова в результате лесовосстановления;
- Снижение сомкнутости насаждений, в том числе в результате селективных вырубок.

Оценки площадей сплошных вырубок в лесах тестового участка, выявленных с использованием метода покомпонентных разностей, приведены в таблице 7.



Сравнительный анализ результатов выявления вырубок в лесах тестового участка, полученных с использованием различных методов анализа временных серий спутниковых изображений, может быть выполнен по приведенным в таблице 8 и на рисунке 2 данным.

Таблица 7. Площади сплошных вырубок, выявленных методом покомпонентных разностей по изображениям Landsat-ETM+ (11.07. 2001 и 06.06.2002)

Тип леса	Площадь	
	км <sup>2</sup>	%
Темнохвойные леса	22,988	82,19
Светлохвойные леса	3,789	13,55
Лиственные леса	0,007	0,03
Смешанные леса	1,157	4,14
Редкостойные леса	0,0026	0,09
<b>Все леса</b>	<b>27,968</b>	<b>100</b>

Таблица 8. Сравнение площадей вырубок, полученных с использованием различных методов анализа спутниковых изображений

Тип леса	Независимая классификация изображений (км <sup>2</sup> )	Метод поканальных разностей (км <sup>2</sup> )	Метод поканальных разностей (км <sup>2</sup> )	Метод покомпонентных разностей (км <sup>2</sup> )
	03.08.1989-11.07. 2001	11.07. 2001- 06.06.2002		
Темнохвойные	504,01	475,88	16,87	22,988
Светлохвойные	97,90	51,24	2,11	3,789
Лиственные	20,54	9,27	0,07	0,007
Смешанные	37,24	23,42	1,79	1,157
Редкостойные	2,21	0,03	0,04	0,0026
<b>Все леса</b>	<b>661,92</b>	<b>552,53</b>	<b>20,87</b>	<b>27,968</b>

### Анализ полученных результатов и выводы

Выполненные исследования позволили оценить возможности использования различных методов анализа разновременных спутниковых изображений Landsat-TM и ETM+ для выявления вырубок таежных лесов европейского севера России. Анализ преимуществ и ограничений трех использованных в исследованиях методов приводится в таблице 9.

Метод сравнения результатов независимой классификации изображений обладает, прежде всего, высоким уровнем независимости получаемых результатов от различий в фенологическом состоянии лесной растительности и условий проведения спутниковой съемки при использовании разновременных изображений. Кроме того, использование указанного метода позволяет просто и однозначно осуществлять тематическую интерпретацию выявляемых изменений, ограниченную в то же время выбранным множеством классов. Точность метода в значительной мере определяется качеством независимой классификации исходных изображений. Достаточно точная классификация изображения требует значительных (по сравнению с другими методами) временных затрат и предъявляет высокие требования к знанию обследуемой территории. К числу принципиальных ограничений метода также относится и невозможность на настоящем этапе полностью автоматической его реализации.

Метод поканальных разностей взаимно нормализованных изображений прост в реализации и в достаточной степени позволяет выделять качественные изменения. К его недостаткам можно отнести сложность тематической интерпретации полученных изменений и необходимость задания фиксированных пороговых значений при детектировании, и высокая чувствительность к шуму, возникающему вследствие неполного пространственного совмещения и ограничений радиометрической нормализации изображений.

Метод покомпонентных разностей результатов декомпозиции спектральных смесей позволяет оценивать пропорции тематических классов в пикселях, что обеспечивает простое решение последующей задачи интерпретации изменений и позволяет оценивать величины указанных изменений в количественных шкалах. К ограничениям метода можно считать необходимость выбора значений чистых компонент, что предъявляет требования к наличию априорных данных для данного участка, включая данные о множестве чистых компонент и значениях их яркости в каждом из спектральных каналов.

Таблица 9. Преимущества и ограничения методов выявления вырубок в лесах по разновременным спутниковым изображениям

Методы	Преимущества	Ограничения
<b>Метод сравнения результатов независимой классификации изображений</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Высокий уровень независимости от различий фенологического состояния растительности и условий спутниковой съемки</li> <li>– Простота тематической интерпретации выявленных изменений</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Типы выявляемых изменений ограничены заданным множеством классов лесных насаждений и непокрытых лесом земель</li> <li>– Невозможность выявления изменений переходного характера</li> <li>– Необходимость наличия априорных знаний о территории</li> <li>– Классификация изображения требует активного участия эксперта</li> </ul>
<b>Метод поканальных разностей взаимно нормализованных изображений</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Возможность выявления изменений переходного характера</li> <li>– Существует возможность автоматической реализации</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Сложность тематической интерпретации выявленных изменений</li> <li>– Существенная зависимость от различий фенологического состояния растительности и условий спутниковой съемки</li> <li>– Необходимость выбора оптимальных порогов</li> </ul>
<b>Метод покомпонентных разностей результатов декомпозиции спектральных смесей</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Высокий уровень независимости от различий фенологического состояния растительности и условий спутниковой съемки</li> <li>– Простота тематической интерпретации выявленных изменений</li> <li>– Возможность выявления и количественной оценки изменений переходного характера</li> <li>– Существует возможность автоматической реализации</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Существенная зависимость результатов от выбора множества анализируемых компонент</li> <li>– Необходимость наличия данных о спектральных яркостях чистых компонент</li> <li>– Количество чистых компонент должно быть не больше количества спектральных каналов.</li> </ul>

## Литература

1. Исаев А.С., Г.Н. Коровин, В.И. Сухих и др. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России (аналитический обзор). Центр экологической политики России, М., 1995, 156с.
2. Сухих В.И. Лесопользование в России в начале XXI в. Лесное хозяйство. № 6, 1999, с. 8-13.
3. Milne A. K., 1988. Change direction analysis using Landsat imagery: a review of methodology. *Proc. IGARSS'88 Symp.* (ESA SP-284), Edinburgh, Scotland, 541-544.
4. Global land Cover Facility <http://glcf.umiacs.umd.edu>
5. Bartalev, S., M. Deshayes, S. Durrieu, G. Fabre, N. Stach, and V. Sukhikh, 1997. Monitoring by change detection in three different forest environments, *Proceedings International Workshop Applications of Remote Sensing in European forest Monitoring*, Vienna, 14-16 October 1996, Report EUR 17685 EN, pp 293-308.
6. Häme T. Spectral interpretation of changes in forest using satellite scanner images// The Society of Forestry of Finland – The Finnish Forest Research Institute, Helsinki, 1991, 111p.
7. Coppin P. R. and Bauer M. E., 1996. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote sensing reviews*, 13, 207-234.
8. Greenpeace России [www.greenpeace.org/russia/ru](http://www.greenpeace.org/russia/ru)
9. Все о российских лесах (Клуб неправительственных природоохранных организаций России) [www.forest.ru/rus/publications](http://www.forest.ru/rus/publications)
10. Ярошенко А.Ю., Потанов П.В., Турубанова С.А. Малонарушенные лесные территории европейского Севера России. – М.: Гринпис России, 2001. – 75с.
11. Adams J.B., Smith M.O., Johnson P.E. Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site // *Journal of Geophysical Research*, 1986, N91. - p. 8098 - 8112.

# METHODS FOR THE ANALYSIS OF TIME-SERIES OF HIGH-RESOLUTION SATELLITE IMAGES FOR THE ASSESSMENT OF LOGGING IN THE TAIGA

Bartalev S.A.<sup>1</sup>, Kuryatnikova T.S.<sup>1</sup>, Stibig H.-J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,  
117997, 84/32 Profsoyuznaya str., Moscow, Russia  
E-mail: bempl@d902.iki.rssi.ru*

<sup>2</sup> *Joint Research Center of the European Commission  
I-21020 Ispra (VA), Italy  
E-mail: hans-urgen.stibig@jrc.it*

Although timber production in Russian forests is of great economic importance, forest logging is a main factor of anthropogenic change in boreal forest ecosystems. Regularly updated information on the scale and the temporal dynamic of these changes is therefore desired. The available historical imagery from the Landsat satellites series provides an unique opportunity for a retrospective analysis of forest cover dynamics in Russian forests resulting from the logging activities of the last two decades. This paper describes possibilities of using a time-series of Landsat images for the mapping and area assessment of forest clear-cuts in the Russian Taiga. The study was carried out for a test site in the Komi Republic, comparing different methods for clear cut detection, based on a multi-temporal set of high-resolution Landsat satellite data. The study examines the potential of such satellite data to assess the long-term impact of logging on forest cover at regional and national levels.

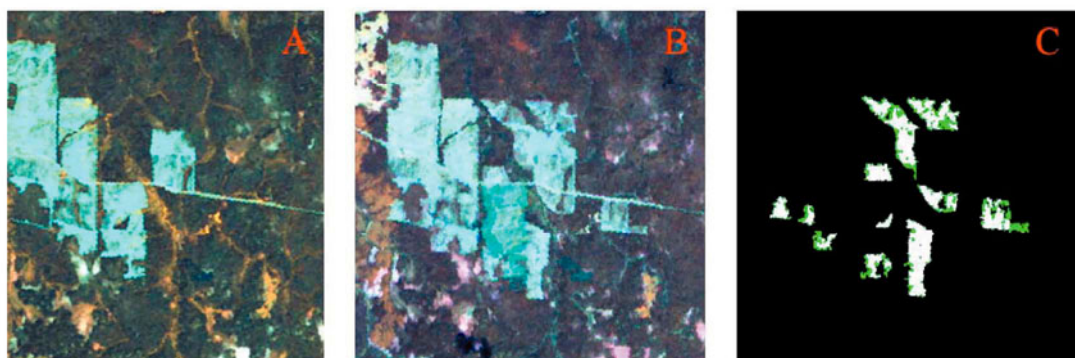


Рис. 2 Сравнение результатов выявления вырубок лесов по разновременным спутниковым изображениям с использованием метода поканальных разностей взаимно нормализованных изображений и метода покомпонентных разностей результатов декомпозиции спектральных смесей:

А и 2В - Фрагменты изображений Landsat-ETM на территорию Междуреченского лесхоза Республики Коми (RGB: TM3, TM5, TM4);

С - Участки вырубок леса, выявленные одновременно обоими методами (белый) и только методом покомпонентных разностей результатов декомпозиции спектральных смесей (зеленый).