

Задачи дистанционного зондирования лесов при изучении глобальных климатических изменений

А.А. Чухланцев, В.П. Саворский

*ФИРЭ им.В.А.Котельникова РАН,
141190 г.Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1
E-mail: chukhlantsev@ms.ire.rssi.ru; savor@ire.rssi.ru*

Дистанционные наблюдения за санитарным состоянием лесов и лесопатологической обстановкой являются одним из основных способов лесопатологического мониторинга. При этом основной целью дистанционных наблюдений является своевременное обнаружение опасных отклонений в санитарном состоянии лесов, а также предварительная оценка размеров повреждений. Однако существует круг задач дистанционного зондирования лесов, который определяется их существенной ролью в процессах формирования и изменения климата. Как следует из проведенных к настоящему времени исследований, климатические тренды существенно зависят от состояния глобального растительного покрова. Для оценки этой зависимости применяются глобальные модели, использующие параметры, которые, в принципе, могут быть определены по данным спутникового мониторинга. В частности, в ряде исследований используется индекс NDVI для расчета средних за месяц полей доли фотосинтетически активной радиации, поглощенной зелеными листьями растительного полого. В результате оцениваются скорости транспирации и фотосинтеза. Теоретические оценки составляющих радиационного баланса в системе атмосфера-растительность-почва требуют знания параметров пограничного слоя атмосферы, динамических параметров растительности и почвы, например, биомассы, температуры почвы и запаса воды в слое корней. Для высоких широт требуется информация о запасах снега и льда. В данной работе рассматриваются возможности дистанционного зондирования растительных покровов из космоса для определения параметров глобальных климатических моделей. Формулируются задачи спутникового мониторинга лесов при изучении и прогнозе глобальных климатических изменений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, лесные экосистемы, глобальные климатические изменения.

Введение

Ожидается, что в течение 30-50 лет уровень содержания парниковых газов в атмосфере может удвоиться, что приведет к серьезному изменению климата. В наибольшей степени от этого изменения могут пострадать бореальные леса – до 65% этих лесов могут быть утрачены. В связи с этим мониторинг лесных экосистем является одним из основных направлений в лесном хозяйстве и исследованиях изменения климата. Роль лесов при изучении изменения климата является двойкой. С одной стороны, леса оказывают влияние на климат, забирая углекислый газ из атмосферы и выделяя его в атмосферу. С другой стороны, состояние лесных экосистем является одним из индикаторов экологических и климатических изменений. Для определения круга задач дистанционного зондирования лесов при изучении климатических изменений необходимо, прежде всего, выяснить какие характеристики лесных экосистем определяют влияние лесных экосистем на климатические изменения в большей степени и, вследствие этого, являются параметрами глобальных моделей, используемых для оценки климатических трендов. Также важно определить характеристики лесных экосистем, в наибольшей степени подверженные влиянию климатических изменений (Medvedeva et al., 2009). Следует также выяснить возможности определения этих определенных выше индикативных характеристик по данным дистанционного зондирования. Рассмотрение указанных вопросов, проводимое в данной работе, позволяет обосновать состав задач дистанционного зондирования, т.е. состав видов и характеристик дистанционной

съемки, требуемый для информационного обеспечения решения задач экологического мониторинга лесов (Барталев, Исаев, 2004).

1. Индикативные характеристики состояния лесных экосистем

1.1. Характеристики, определяемые при лесопатологическом мониторинге (ЛПМ)

Основными элементами осуществления лесопатологического мониторинга являются: наземные регулярные наблюдения выборочными методами, дистанционные наблюдения за санитарным состоянием лесов и лесопатологической обстановкой, лесопатологическая таксация, экспедиционные обследования. Наземные регулярные наблюдения осуществляются на сети постоянных пунктов наблюдения, размещенных с учетом выделенных однородных групп (страт) лесных насаждений, сходных по основным таксационным показателям. На пунктах проводится определение пород деревьев, измеряется диаметр деревьев на высоте 1,3 м, оценивается состояние деревьев, фиксируются признаки ослабления или повреждения деревьев и вызвавшие их причины. Основной целью дистанционных наблюдений является своевременное обнаружение опасных отклонений в санитарном состоянии лесов, а также предварительная оценка размеров повреждений (Барталев, Ершов, Исаев, 1999).

Получаемые в результате ЛПМ данные могут дать представление о влиянии климатических изменений на состояние лесных экосистем. Однако набор получаемых при этом данных, как наземных, так и дистанционных, не является достаточным при определении влияния лесов на экологические изменения. Кроме того, как в случае любых точечных измерений, экстраполяция данных, полученных на пунктах наблюдения, на большие площади требует разработки специальных технологий.

1.2. Характеристики лесных экосистем, в наибольшей степени подверженные влиянию экологических изменений

В 1985 году экономической комиссией ООН по Европе запущена Международная кооперативная программа по мониторингу и оценке влияния эффектов загрязнения воздуха на состояние лесов (ICP Forests). В настоящее время в Программе участвует 41 страна, в том числе, США, Канада и Россия (<http://www.icp-forests.org/>).

Первый уровень наблюдений включает пункты наблюдения (сетка 16×16 км), расположенные на 6000 делянках в Европе. На пунктах проводятся ежегодные наблюдения за состоянием кроны, состоянием почвы и листвы. Ключевыми параметрами оценки состояния крон являются дефолиация и изменение цвета. При почвенном анализе определяются такие характеристики, как содержание влаги, механический состав, кислотность, содержание органического углерода, содержание основных и кислотных катионов.

В техническом отчете по Программе за 2009 год особое внимание уделено состоянию еловых лесов в России. Главными вредоносными факторами, воздействующими на состояние еловых лесов, являются лесные пожары, вырубki, загрязнение воздуха, изменение погоды, ветряной лесоповал и поломка ветвей снегом, нашествие насекомых-вредителей, грибковые заболевания. Ель, с ее очень поверхностной корневой системой, очень восприимчива к негативным последствиям засухи. Вырубki, особенно при мозаичной порубке, ве-

дут к изменению гидрологического и светового режима на больших территориях и усугубляют воздействия засухи.

1.3. Характеристики лесных экосистем, определяющие влияние лесов на климатические изменения

Суммарно поглощаемый растениями из атмосферы поток углерода приблизительно колеблется около величины 120 ГтС/год. Обрато в атмосфере часть углерода возвращается довольно быстро за счет транспирации (≈ 60 ГтС/год) и разложения мертвого органического вещества (≈ 10 ГтС/год). Леса в этот баланс вносят наибольший вклад. При этом различные леса имеют значительно расходящиеся внутренние и внешние запасы и потоки углерода. Отсюда следует, что усредненные по большим территориям оценки потоков углерода не дают даже приблизительной картины изменения его запасов в резервуарах биосферы.

Накопление биомассы в лесной экосистеме напрямую связано с усвоением атмосферного углерода. Например, если лес растет со скоростью 3 тС/год/га, то одна тонна углерода может быть отнесена за счет эффекта усвоения атмосферного CO₂. Для расчета полной продукции фотосинтеза GPP используется формула (Kondratyev et al, 2008): $GPP = \varepsilon f(T)g(w)$ x FPAR x PAR, где FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation) – доля доступной радиации в фотосинтетически активном диапазоне волн (400-700 нм), которая поглощается растительным пологом, PAR – фитосинтетически активная радиация, ε – максимальная эффективность, с которой световая энергия преобразуется в сухое вещество при росте деревьев в благоприятных условиях окружающей среды, функции f и g отражают зависимость продукции фотосинтеза от температуры почвы и содержания воды в почве. Эти функции обычно определяются для каждой территории эмпирически.

Таким образом, основными характеристиками, определяющими освоение атмосферного углерода лесом, являются тип почвенно-растительной формации и его биофизические параметры (густота леса, высота и диаметр деревьев, протяженность кроны и др.), FPAR, PAR, температура растительности и почвы, влагосодержание почвы.

2. Возможности определения индикативных характеристик лесных экосистем по данным дистанционного зондирования

2.1. Определение характеристик лесных экосистем по данным дистанционного зондирования в оптическом диапазоне

Основные направления мониторинга лесных экосистем по данным космической съемки в оптическом диапазоне и оцениваемые характеристики приведены в таблице 1 (Барталев, Исаев, Лупян, 2005; Барталев, 2007).

Спутниковые технологии оценки биофизических характеристик по их связям с измеренными значениями различных спектральных индексов достаточно хорошо развиты. В связи с этим ряд моделей фотосинтеза и расчета первичной продукции леса (Kondratyev et al, 2008) в качестве исходных данных используют уже не биофизические характеристики лесной экосистемы, а данные спутниковых измерений в оптическом, ближнем инфракрасном и, частично, в микроволновом диапазоне волн.

2.2. Определение характеристик лесных экосистем по данным радиолокационного зондирования из космоса

В настоящее время для радиолокационной съемки из космоса используются радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА). Начальным этапом в проведении тематической обработки радиолокационных данных является выделение областей, покрытых растительностью (Kuntz et al, 1999), классификация типов рассеивающей поверхности, определение видов растительности и проведение границ биотических сообществ (Keil et al, 1999).

Важнейшим параметром, описывающим функционирование экосистемы, является биомасса растительности, приходящаяся на единицу площади, для оценки которой используется радиолокационная съемка в L-диапазоне и P-диапазоне (Le Toan et al, 1992). Мониторинг последствий лесных пожаров проводится при помощи оценки динамики значений коэффициента обратного рассеяния (Bourgeau-Chavez et al, 1994).

Таблица 1. Основные направления дистанционного мониторинга лесных экосистем

Направление мониторинга	Наблюдаемые объекты и явления	Оцениваемые характеристики
Картографирование и оценка структуры лесов	Растительный покров Водно-болотные комплексы Непокрытые растительностью земли	Жизненные формы растительности Тип вегетативных органов Фенологический тип растительности Видовой состав растительности Возрастная структура лесов
Оценка биофизических характеристик лесов	Лесной покров	Надземная биомасса Индекс листовой поверхности (LAI) Объем первичной продукции (NPP) Доля поглощенной ФАР* (FPAR) Концентрация хлорофилла 3D структура лесного покрова
Оценка возмущающих воздействий на леса	Лесные пожары Вырубки лесов Факторы биотического воздействия Факторы техногенного воздействия Восстановительная динамика лесов	Тип фактора воздействия Площадь повреждений Степень повреждений Время события Скорость восстановления растительности
Оценка фенологической динамики лесов	Фенологическая динамика лесных экосистем	Продолжительность залегания снега Продолжительность вегетационного сезона Сроки наступления фенологических фаз
Оценка многолетних трендов состояния лесов	Границы биомов и зоны перехода Структура лесного покрова Биофизические характеристики Режимы землепользования Возмущающие воздействия на леса Фенологические ритмы	Наличие трендовой динамики Направление трендовой динамики Скорость трендовой динамики
Оценка физических характеристик поверхности	Все типы наземных экосистем	Альbedo Температура Влагосодержание

Для получения информации о высотной структуре леса используется радиолокационная интерферометрия (Cloude and Papathanassiou, 1998).

Дальнейшее развитие применения радиолокационной съемки для мониторинга состояния лесов связано с доработкой физических моделей радиолокационного рассеяния, выбором оптимальных длин волн и поляризаций, совершенствованием методов обработки данных, например использования информации о фазе отраженного сигнала.

2.3. Определение характеристик лесных экосистем по данным микроволнового радиометрического зондирования из космоса

Как отмечалось выше, важнейшей характеристикой состояния лесной экосистемы является влажность почвы и лесной подстилки. Эти параметрами характеризуют гидрологический режим экосистемы, а также опасность возникновения пожара в лесу. Основным методом дистанционной съемки, позволяющим оценивать указанные параметры, является микроволновая радиометрия.

Предложенная в (Кирдяшев и др., 1979) радиационная модель, связывающая яркостную температуру леса с влажностью почвы и биомассой растительности, используется для расчетов яркостной температуры леса при моделировании яркостной температуры земной поверхности в глобальном масштабе (Pellarin et al, 2003) с пространственным разрешением, соответствующим разрешению спутниковых радиометрических систем L-диапазона (длина волны 21 см). Проведенный анализ чувствительности яркостной температуры к сезонному изменению параметров покровов показал, что для тропических лесов сезонные вариации яркостной температуры незначительны. Однако для бореальных лесов сезонные вариации яркостной температуры могут достигать 30К и более, что говорит о возможности использования данных микроволнового зондирования для оценки влажности почвы.

Обзор экспериментальных исследований микроволнового излучения леса приведен в (Pamprani, 2004). Сведения об аналогичных исследованиях, проведенных в России, приведены в (Мильшин и Гранков, 2000) и показывают значительную изменчивость коэффициента излучения леса, связанную с вариациями влажности почвы и биомассы леса. Вышеуказанные и другие известные результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что микроволновая радиометрия является эффективным инструментом для мониторинга характеристик почвы и растительности в лесах.

В ряде работ показана возможность и разработаны алгоритмы оценки пожароопасности лесов по данным долговременных радиометрических измерений (Валендик и др., 1980; Кирдяшев и Саворский, 1986; Гранков и др., 1999).

3. Задачи дистанционного зондирования лесных экосистем

3.1. Печень индикативных характеристик лесных экосистем и требования по определению этих характеристик

Печень основных индикативных характеристик лесных экосистем, определяемых по данным дистанционного зондирования, и требования по определению этих характеристик приведены в таблице 2. Данный перечень является обобщением результатов анализа, проведенного в разделах 1 и 2.

Таблица 2. Основные индикативные характеристики лесных экосистем и требования по их определению

Характеристика	Требуемое пространственное разрешение	Требуемая периодичность определения
Тип почвенно-растительной формации и занимаемая им площадь, возрастная структура	1 км	5 лет
Биофизические характеристики растительности: диаметр и высота деревьев; биомасса полога	1 км	5 лет
Характеристики почвы: тип почвы; влагосодержание.	1-50 км	ежемесячно
Состояние кроны: дефолиация; дехромация	1-30м	Ежемесячно
Характеристики возмущающих воздействий на лес: тип воздействия; площадь повреждений; степень повреждений; время события; скорость восстановления растительности	1-20 м	В зависимости от типа воздействия
Продукционные характеристики: индекс листовой поверхности (LAI); NDVI; доля поглощенной ФАР (FPAR); концентрация хлорофилла	1 км	Ежемесячно
Фенологические характеристики: время покрытия снегом, высота и влагосодержание снежного покрова; продолжительность вегетационного периода	1-50 км	Ежемесячно
Характеристики поверхности: альбедо; температура	1-50 км	Еженедельно

3.2. Состав задач дистанционного зондирования лесных экосистем при экологическом мониторинге

Под составом задач дистанционного зондирования в данной работе понимается состав видов и характеристик дистанционной съемки, требуемый для информационного обеспечения решения задач экологического мониторинга лесов. Указанный состав представлен в таблице 3.

Технологии использования дистанционных данных в экологическом мониторинге леса должны базироваться как на данных имеющихся отечественных и иностранных спутников, так и на данных планируемых к запуску российских спутников. Кроме того, результаты данного исследования могут служить базой для выработки решения по составу и характеристикам съемочной аппаратуры этих спутников.

Таблица 3. Виды и характеристики дистанционной съемки при экологическом мониторинге лесов

Вид дистанционной съемки	Задачи, решаемые с использованием данного вида съемки	Российские спутники, способные осуществлять данный вид съемки	Зарубежные спутники, способные осуществлять данный вид съемки
Панхроматическая съемка с высоким линейным пространственным разрешением. Мультиспектральная съемка в видимом и ближнем ИК диапазонах с высоким линейным пространственным разрешением	Обнаружение, идентификация и описание опасных природных и техногенных явлений, прогноз и мониторинг чрезвычайных ситуаций, оценка последствий экологического ущерба при природных катастрофах. Оценка характеристик возмущающих воздействий на лес. Определение видового состава леса. Картирование лесов. Контроль состояния кроны в районах пунктов постоянного наблюдения.	Ресурс-ДК	WorldView-2, GeoEye-1, Ikonos, QuickBird
Мультиспектральная съемка в видимом и ИК диапазоне со средним и низким пространственным разрешением	Определение продукционных характеристик лесных экосистем. Определение фенологических характеристик. Определение характеристик поверхности.	Метеор 1	Landsat-7, Spot-5, Terra, Aqua, RapidEye
Гиперспектральная съемка в видимом и ИК диапазоне со средним пространственным разрешением	Оценка характеристик возмущающих воздействий на лес. Определение видового состава леса. Контроль состояния кроны.	Отсутствуют	EO-1 (Hyperion, ALI), Terra (Aster)
Радиолокационная съёмка со средним пространственным разрешением	Определение биофизических характеристик растительности. Определение характеристик почвы. Оценка характеристик возмущающих воздействий на лес.	Отсутствуют	Envisat, ERS-1,2 TerraSAR-X, RadarSat-1,2 ALOS
Микроволновая радиометрическая съемка с низким пространственным разрешением	Картирование влажности почвы. Наблюдение динамики гидрологического режима.		Aqua (AMSR-E), SMOS

Заключение

Основным результатом работы является выявление возможности определения комплекса индикативных характеристик по данным совместного дистанционного зондирования в оптическом и радиодиапазоне. Ранее дистанционные исследования леса, как правило, проводились либо в оптическом диапазоне, либо в радиодиапазоне. При этом в радиодиапазоне использовались радиолокационные данные. Использование дистанционных данных, полученных в каком либо одном диапазоне, не позволяло в полной мере получить данные обо всем наборе параметров, характеризующих экологическое состояние лесных массивов. В данной работе основной упор делается на совместной обработке данных различных ди-

апазонов длин волн, что позволяет получить синергетический эффект, т.е. не только получить более полный набор индикативных характеристик, но и повысить информативность различных дистанционных сенсоров путем совместной обработки данных.

Литература

1. Bourgeau-Chavez, L.L., Kasischke, E.S., French, N.H.F., Szeto, L.H., Kherkher, C.M. Using ERS-1 SAR imagery to monitor variations in burn severity in an Alaskan fire-disturbed boreal forest ecosystem // Proceedings of IGARSS'94. Pasadena. 1994. P. 243-245.
2. Cloude S.R. and Papathanassiou K.P. Polarimetric SAR Interferometry // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1998. V.36. No.5. P.1551-1565.
3. Keil M., Akgoz E., Carl S., Forster B., Hausler T., Johlige A., Lauter M., and Martin K. Use of SIR-C/X SAR and Landsat TM data for vegetation mapping in the Bavarian Forest National Park and in the mountings // Proceedings of IGARSS'99, Hamburg. 1999. P.293-295.
4. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Varotsos C.A. Global Carbon Cycle and Climate Change // Chichester, UK: Springer/Praxis, 2008. 561 pp.
5. Kuntz S., Seigert F., Rucker G. ERS SAR images for tropical rain forest and land use monitoring, change detection over five years and comparison with RADARSAT and JERS SAR images // Proceedings of IGARSS'99. Hamburg. 1999. P.910-912.
6. Le Toan T., Beaudoin A., Riom J., Guyon D. Relating Forest Biomass to SAR Data // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1992. V.30. No.2. P.403-411.
7. Medvedeva M.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Loupian E.A. New Method of Analysis of Climate-induced Long-term Vegetation Dynamics in Northern Asia Based on NOAA AVHRR Data // The 30th Asian Conference on Remote Sensing. Beijing China. 18-23 October 2009, 2009. P.6.
8. Pampaloni P. Microwave radiometry of forests // Waves in Random Media, 2004. V.14. P.S275-S298.
9. Pellarin T., Wigneron J.-P., Calvet J.-C., Berger M., Douville H., Ferrazzoli P., Kerr Y.H., Lopez-Baesa E., Pulliainen J., Simmonds L.P., and Waldteufel P. Two-year global simulation of L-band brightness temperatures over land // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2003. V. 41. P. 2135-2139.
10. Барталев С.А. Разработка методов оценки состояния и динамики лесов на основе данных спутниковых наблюдений. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук // М: ИКИ РАН, 2007. 291 с.
11. Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С. Оценка дефолиации лесов по мнوسпектральным спутниковым изображениям методом декомпозиции спектральных смесей // Исследование Земли из космоса, 1999. № 4. С.76-86.
12. Барталев С.А., Исаев А.С. Современные возможности спутникового мониторинга динамики лесных бореальных экосистем северной Евразии // Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы: экологические, ресурсные и хозяйственные аспекты. - Петрозаводск: ИЛ КарНЦ РАН, 2004. С.18-28.
13. Барталев С.А., Исаев А.С., Лупян Е.А. Современные приоритеты развития мониторинга бореальных экосистем по данным спутниковых наблюдений // Сибирский экологический журнал, 2005. № 6. Т.12. С.1039-1054.
14. Валендик Е.М., Кисляков Е.К., Сухинин А.И. Оценка пожароопасности леса по данным СВЧ радиометрических измерений // Исследование Земли из космоса, 1980. № 3. С. 14-19.
15. Гранков А.Г., Кузнецов О.О., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К. Сезонная и годовая динамика микроволнового излучения леса при различной степени пожарной опасности по данным SSM/I // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 1999. № 10. С. 2-14.
16. Курдяшев К.П., Саворский В.П. Статистические оценки пожароопасности леса по данным СВЧ радиометрических измерений // Радиотехника и электроника, 1986. Т. 31. С. 1239-1241.
17. Курдяшев К.П., Чухланцев А.А., Шутко А.М. СВЧ излучение земной поверхности при наличии растительного покрова // Радиотехника и электроника, 1979. Т. 24, № 2. С. 256-264.
18. Мильшин А.А., Гранков А.Г. Некоторые экспериментальные результаты исследования микроволнового излучения лесов в L диапазоне // Исследование Земли из космоса, 2000. № 3. С. 50-57.

Remote sensing of forests in context of global change

A.A. Chukhlantsev, V.P. Savorskij

*Institute of Radio Engineering and Electronics, RAS
141190 Friazino Moscow region, 1 Vvedensky Sq.
E-mail: chukhlantsev@ms.ire.rssi.ru; savor@ire.rssi.ru*

Remote sensing of forest's sanitary state and damage is one of the basic mean of forest monitoring and conservation. Remote sensing of forests also can be applied to the study of their role in forming and changing climate. Climatic trends depend on the state of global vegetation. To understand this dependence, global climatic models utilize vegetation parameters which can be retrieved from remote sensing data. Particularly, some models use NDVI to calculate absorbed photo synthetically active radiation and estimate the rate of transpiration and photosynthesis. To estimate components of radiation balance in the system "soil-vegetation-atmosphere", soil moisture and temperature, vegetation biomass, parameters of atmospheric border layer, and other parameters should be known. In this research, the potential of remote sensing means for estimation of these parameters are analyzed. The types and parameters of sensors for satellite monitoring of forests are proposed.

Keywords: remote sensing, forest ecosystems, global climatic change.