

МИКРОВОЛНОВОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЛЕСОВ В КОНТЕКСТЕ ИЗУЧЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА. ОБЗОР

Д.ф.-м.н., профессор **В.Ф. Крапивин**¹, к.т.н. **И.И. Потапов**²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация. E-mail: vkrapivin_36@mail.ru.

² Всероссийский институт научной и технической информации, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация. E-mail : ipotapov_37@mail.ru.

MICROWAVE REMOTE SENSING OF FORESTS IN CONTEXT OF GLOBAL CHANGE STUDY. REVIEW

V.F. Krapivin, I.I. Potapov

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

Key words: remote sensing, forest ecosystems, global climatic change.

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 доли фотосинтетически активной радиации, поглощенной зеленой листвой растительного покрова. 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.

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. Particu-

larly, 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.

Введение

Большая часть поверхности Земли покрыта лесами. Северные бореальные леса составляют почти одну треть от всех земных лесных экосистем и занимают площадь около полутора миллиарда гектаров. Рациональное управление лесными территориями, учитывающее сохранение окружающей среды, является одной из наиболее серьезных и жгучих задач нашего времени. 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 именно бореальные леса, что, по некоторым оценкам, может привести к сокращению площади бореальных лесов – до 65% этих лесов могут быть утеряны.

Роль лесов при изучении изменения климата является двоякой. 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.

В связи с вышесказанным мониторинг лесных экосистем является одним из основных направлений в лесном хозяйстве и исследованиях изменения климата. Дистанционные наблюдения за санитарным состоянием лесов и лесопатологической обстановкой с помощью средств дистанционного зондирования авиационного и космического базирования являются в настоящее время 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.

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. 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.

1. Индикативные характеристики состояния лесных экосистем

1.1. Характеристики, определяемые при лесопатологическом мониторинге (ЛПМ).

Организация и проведение ЛПМ в РФ регламентируется рядом нормативных документов, прежде всего, Лесным кодексом РФ, а также постановлениями Правительства РФ, ведомственными приказами и инструкциями. Постановлением Правительства РФ № 414 от 29.06.2007 г. утверждены «Правила санитарной безопасности в лесах». Приказом Рослесхоза № 523 от 29.12.2007 г. утверждено «Руководство по проектированию, организации и ведению лесопатологического мониторинга».

Основными элементами (способами) осуществления лесопатологического мониторинга являются:

- наземные регулярные наблюдения за состоянием объектов ЛПМ выборочными методами;
- дистанционные наблюдения за санитарным состоянием лесов и лесопатологической обстановкой;
- лесопатологическая таксация;
- учеты численности вредителей и развития болезней;
- экспедиционные обследования.

Основной целью наземных регулярных наблюдений за состоянием объектов ЛПМ выборочными методами на основе стратификации участков лесного фонда является своевременное обнаружение опасных отклонений в санитарном и лесопатологическом состоянии лесов. Наземные регулярные наблюдения за состоянием объектов ЛПМ осуществляются на сети постоянных пунктов наблюдения (ППН), размещенных с учетом выделенных однородных групп (страт) лесных насаждений, сходных по основным таксационным показателям. На ППН 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. Дистанционные наблюдения за санитарным состоянием лесов предусматривают космическую и авиационную съемку, аэровизуальное обследование лесов. Дистанционные наблюдения могут представлять собой регулярные выборочные наблюдения, либо специальные обследования в случае возникновения массовых повреждений лесов. Оценка состояния лесов способом дистанционных наблюдений осуществляется путем дешифрирования материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), распознавания на них признаков повреждения и гибели лесных насаждений. Дешифрирование материалов ДЗЗ проводится с привлечением результатов наземных наблюдений за состоянием объектов лесопатологического мониторинга на тестовых участках. Тестовым может быть любой участок леса, по которому имеется характеристика состояния древостоя на момент производства съемки. Предпочтение отдается тестовым участкам леса, на которых имеется ППН. Для обнаружения повреждений отдельных деревьев используется материалов ДЗЗ высокого (метрового и субметрового) пространственного разрешения, на которых опознаются повреждения части крон или отдельных ветвей в кронах деревьев. При значительном повреждении крон деревьев с увеличением линейных размеров участков повреж-

денного леса или погибших насаждений, используются материалы ДЗЗ с меньшим пространственным разрешением.

Основной целью лесопатологической таксации является сбор информации о санитарном состоянии участков леса (степень захламления, усыхания, загрязнения) и (или) их лесопатологическом состоянии (степень повреждения вредными организмами). Полученная информация характеризует участки леса определенной площади и местоположения.

Целью экспедиционных обследований является определение санитарного и лесопатологического состояния лесов на значительных площадях в труднодоступных в течение вегетационного периода районах, а также в районах со сложной лесопатологической обстановкой, наличием массовых очагов вредных организмов.

Из вышесказанного следует, что имеющаяся практика лесопатологического мониторинга в Российской Федерации позволяет оперативно выявлять повреждения (поражения) лесов вредными организмами и другими негативными воздействиями природного и антропогенного характера. Получаемые в результате ЛПМ данные могут дать представление о влиянии климатических изменений на состояние лесных экосистем. Однако набор получаемых при ЛПМ 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 ППН, 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 (International Co-operative Programme on the Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests)). В настоящее время в Программе участвует 41 страна, в том числе, США, Канада и Россия. Целью выполнения Программы является следующее (<http://www.icp-forests.org/>).

1. Мониторинг пространственной и временной изменчивости состояния лесов на региональном, национальном и международном уровнях, определение влияния на это состояние стрессовых факторов, в том числе загрязнителей воздуха.

2. Улучшение понимания механизмов и причинно-следственных связей воздействия повреждающих факторов на лесные экосистемы.

3. Обеспечение лучшего понимания взаимодействия компонентов лесных экосистем между собой под влиянием загрязнения воздуха и других повреждающих факторов.

Первый уровень наблюдений включает пункты наблюдения (сетка 16×16 км), расположенные на 6000 делянках в Европе. На пунктах проводятся ежегодные наблюдения за состоянием кроны (дефолиация, изменение цвета, визуально наблюдаемые повреждения деревьев), состоянием почвы и листвы. На 800 участках проводится интенсивный мониторинг (уровень 2) состояния леса с целью выявления факторов, воздействующих на состояния леса, в том числе стресс-факторов. Мониторинг осуществляется в основном на постоянных участках, репрезентативных для определенного региона.

Визуальные наблюдения за состоянием кроны включает в себя определение таких параметров, как видимость кроны с поверхности земли, определение социального класса деревьев в древостое, взаимное затенение крон, опадание листвы

(дефолиация), прозрачность кроны, видовой состав, возраст древостоя и отдельных деревьев. Кроме того, визуально определяется наличие повреждений кроны, и устанавливаются причины и факторы повреждений. Ключевыми параметрами оценки состояния крон являются дефолиация и изменение цвета. Деревья с дефолиацией до 10% считаются неповрежденными, с дефолиацией 10 – 25% находящимися на «стадии предостережения», более 25% – поврежденными. Поврежденными также считаются деревья с обесцвечиванием более 10% листьев. Ежегодные наблюдения на тестовых участках позволяют получить временные тренды состояния крон деревьев в странах-участниках Программы. Наблюдения показывают, что с конца 90-х годов прошлого века основные типы деревьев находятся на грани стадии предостережения (дефолиация 20-25 %).

Целью широкомасштабного обследования образцов почв при проведении мониторинга на 1-ом уровне является получение и оценка основной информации по химическому состоянию почвы, а также тем ее характеристикам, которые наиболее чувствительны к атмосферному загрязнению. Целью интенсивного изучения почвы на постоянных участках (уровень 2) является выявление изменения почвенных характеристик путем периодической оценки широкого набора параметров. При почвенном анализе определяются такие характеристики, как содержание влаги, механический состав, кислотность, содержание органического углерода, содержание основных и кислотных катионов. Важнейшими для оценки состояния почвы являются уровень pH и отношение содержания основных катионов к содержанию кислотных катионов ($BC/Al = (Ca+Mg+K)/Al$). Для последней характеристики существует критический уровень для каждого типа древостоя, при котором рост деревьев сокращается на 80% и более. Проведенные в рамках Программы исследования показывают, что кислотность почв представляет весьма серьезную угрозу для лесов Европы, поскольку для почти половины участков отношение BC/Al превышает критический уровень.

В техническом отчете по Программе за 2009 год особое внимание уделено состоянию еловых лесов в России. Площадь этих лесов составляет 78 миллионов гектаров, а запас древесины в них оценивается величиной 11 миллиардов кубометров. Ель доминирует в северных лесах ввиду высокой адаптации данной породы к холодному климату и большей приспособленностью к климату, чем у сосны и березы. Сосна и береза могут стать доминантными породами в тайге лишь в случае крайне неблагоприятных экологических условий, вызывающих массовое поражение молодого поколения ели.

В настоящее время главными вредоносными факторами, воздействующими на состояние еловых лесов, являются лесные пожары, рубки, загрязнение воздуха, изменение погоды, ветряной лесоповал и поломка ветвей снегом, нашествие насекомых-вредителей, грибковые заболевания. Еловые леса подвержены многочисленным стрессам: один вредоносный фактор действует как спусковой крючок, запустив другие.

Считается, что широкомасштабные рубки вдоль берегов рек в течение 20-х – 40-х годов прошлого века вызвали заметное изменение гидрологического режима в еловых лесах. Ель, с ее очень поверхностной корневой системой, очень восприимчива к негативным последствиям засухи. В течение прошлого века это явление часто наблюдалось в Белоруссии, где проводились работы по осушению болот и дренированию.

В настоящее время указанные процессы усугубляются рубками, особенно при мозаичной порубке, ведущей к изменению гидрологического и светового

режима на больших территориях. В добавление к этому, зимой 2001-2003 года наблюдались многочисленные поломки ветвей мокрым снегом, накопившимся на кронах деревьев.

Таким образом, первичным фактором или спусковым крючком изменения гидрологического режима является, как правило, вырубка леса. На состояние одно-возрастных лесов существенное влияние оказывают лесные пожары. В связи с этим, еще только предстоит оценить тот ущерб, который был нанесен лесам России летними пожарами 2010 года.

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

Углекислый газ, который растворяется в океанах и поглощается растительностью, уходит из атмосферы через сложные механизмы биосферного круговорота вещества и энергии. В океанах таким механизмом является их карбонатная система, которая при определенных сочетаниях параметров окружающей среды отсасывает атмосферный CO_2 и отправляет его в донные отложения. Судьба CO_2 , который фиксируется на суше, зависит от того, какая экосистема и какой резервуар углерода являются его поглотителем (например, живая биомасса или почва). Углерод, фиксированный в резервуаре, через год или менее (листья, тонкие корни) возвращается в атмосферу или переходит в резервуары со временем оборота от декады до столетий (стволы, стебли, сучья, органическое вещество почвы). В результате формируется чистый поток углерода между наземными экосистемами и атмосферой, внося небольшую неустойчивость между поглощением при фотосинтезе и различными процессами возврата углерода в атмосферу. Растения, микроорганизмы почвы, биохимические процессы и животные участвуют в формировании такой неустойчивости. Изменение климата и активность человека вносят определенный вклад в этот процесс путем трансформации структуры земных экосистем и загрязнения окружающей среды. По имеющимся оценкам [1,2] чистое поглощение CO_2 наземной биосферой составляло $0,2 \pm 1,0$ ГтС/год в период 1980-1989 гг. и $0,7 \pm 1,0$ ГтС/год за 1989-1998 гг. В тоже время чистая эмиссия CO_2 по причинам антропогенного вмешательства в структуру земных покровов составляла $1,7 \pm 0,8$ ГтС/год и $1,6 \pm 0,8$ ГтС/год соответственно. В целом вариации глобального потока углерода оцениваются величиной ± 1 ГтС/год и наблюдается четкая их корреляция с такими явлениями, как Эль-Ниньо или извержение вулканов. Суммарно поглощаемый растениями из атмосферы поток углерода приблизительно колеблется около величины 120 ГтС/год. Обратно в атмосферу 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 и, тем более, с учетом их динамики. Поэтому многочисленные циркуляционные модели углерода, опирающиеся на такие усредненные данные, не могут быть объективным инструментом принятия решений.

Взаимосвязь между глобальным циклом CO_2 и наземной растительностью проявляется через зависимость первичной продукции и скорости разложения отмершей биомассы от температуры и концентрации CO_2 в атмосфере. Через

$R_k(\varphi, \lambda, t)$ в циркуляционных моделях углерода обозначают продукцию фотосинтеза для растительности типа k на широте φ и долготе λ в момент времени t . Поток CO_2 из атмосферы в живую биомассу описывается при этом выражением: $H_6^C(\varphi, \lambda, t) = C_{23} R_k(\varphi, \lambda, t)$, где коэффициент C_{23} отражает эффективность механизма реакции фотосинтеза и в среднем оценивается величиной $C_{23} \cong 0,549$. Разные авторы дают оценку потока $H_6^C(\varphi, \lambda, t)$ в пределах от 16,7 до 35 ГтС/год.

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 CO_2 . Для расчета продукции фотосинтеза $R_k(\varphi, \lambda, t)$ используется формула [1,2]: $R_k(\varphi, \lambda, t) = \varepsilon f(T)g(w) \times \text{FPAR} \times \text{PAR}$, где FPAR (Fraction of Photosynthetically Active radiation) – доля доступной радиации в фотосинтетически активном диапазоне волн (400-700 нм), которая поглощается растительным пологом, PAR – фотосинтетически 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. Оценка фотосинтетически активной радиации требует знания таких параметров полога леса, как его сомкнутость, площадь поверхности листьев, отнесенный к единице площади почвы (индекс листовой поверхности LAI), протяженность кроны и др. В ряде моделей функционирования биоценозов оценка фотосинтетически активной радиации проводится по спутниковым измерениям NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – показателя относительной яркости растительного полога, рассчитываемого по данным измерений яркости в видимом диапазоне (580-680 нм) и ближнем инфракрасном диапазоне (725-1000 нм).

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.), определяющие величину максимальной эффективности накопления биомассы, индекс листовой поверхности, определяющий FPAR, PAR или NDVI, 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.

Данные дистанционного зондирования лесных экосистем в оптическом диапазоне в настоящее время являются основными при определении характеристик этих объектов. Это связано с тем, что этот диапазон первым начал использоваться в ДЗЗ и к настоящему времени наработаны технологии использования дистанционных данных оптического диапазона для указанных целей. Кроме того, в оптическом диапазоне можно получить наилучшее пространственное разрешение, и оптические изображения более привычны для людей.

Характеристики лесных экосистем получают из космических оптических изображений в результате специализированной обработки дистанционных данных, с

учетом априорной информации об исследуемых объектах. Простейшими характеристиками являются тип растительности и занимаемая им площадь. Эти признаки могут быть получены в оптическом диапазоне с достаточно высокой точностью. При этом используются различия в спектрах отражения, характерных для различных типов земных покровов и растительности.

Основные направления мониторинга лесных экосистем по данным космической съемки в оптическом диапазоне и оцениваемые характеристики приведены в таблице 1 [3]. Основные методы выявления изменений в экосистемах и используемые при этом признаки представлены в таблице 2.

Таблица 1.

Основные направления дистанционного мониторинга лесных экосистем.

<i>Направление мониторинга</i>	<i>Наблюдаемые объекты и явления</i>	<i>Оцениваемые характеристики</i>
<i>Картографирование и оценка структуры лесов</i>	Растительный покров Водно-болотные комплексы Непокрытые растительностью земли	Жизненные формы растительности Тип вегетативных органов Фенологический тип растительности Видовой состав растительности Возрастная структура лесов
<i>Оценка биофизических характеристик лесов</i>	Лесной покров	Надземная биомасса Индекс листовой поверхности (LAI) Объем первичной продукции (NPP) Доля поглощенной ФАР* (FPAR) Концентрация хлорофилла 3D структура лесного покрова
<i>Оценка возмущающих воздействий на леса</i>	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
<i>Оценка фенологической динамики лесов</i>	Фенологическая динамика лесных экосистем	Продолжительность залегания снега Продолжительность вегетационного сезона Сроки наступления фенологических фаз
<i>Оценка многолетних трендов состояния лесов</i>	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
<i>Оценка физических характеристик поверхности</i>	Все типы наземных экосистем	Альбедо Температура Влагосодержание

Методы выявления изменений в исследуемых объектах.

Типы признаков	Приоритетные методы выявления изменений		
	Разновременные изображения, полученные:		Одиночные изображения и ГИС
	сенсором одного типа в близких условиях	различными сенсорами или в различных условиях	
<p><i>исходные изображения</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • спектральные яркости; ...или признаки, основанные на спектральных преобразованиях • спектральные индексы; • главные компоненты; ...или признаки, основанные на пространственном анализе • морфологические признаки; • текстурные признаки; ...или признаки, основанные на тематическом анализе данных • результаты классификации; • результаты декомпозиции смесей 	<ul style="list-style-type: none"> • анализ векторов изменений по разным изображениям; • совместная классификация разновременных изображений; • сопоставление результатов независимого анализа разновременных изображений; • цветовой синтез разновременных изображений 	<ul style="list-style-type: none"> • сопоставление результатов независимого анализа разновременных изображений; • совместная классификация разновременных изображений 	<ul style="list-style-type: none"> • выявление аномальных значений признаков на гипотетически однородных участках; • сопоставление результатов тематической обработки изображений с картами лесов

Важнейшими характеристиками лесного полога являются индекс листовой поверхности (LAI), равный площади освещенных листьев, приходящейся на единицу поверхности почвы, и доля доступной радиации в фотосинтетически активном диапазоне волн (400-700 нм), которая поглощается растительным пологом (FPAR). Эти характеристики, являясь биометрическими переменными, описывают структуру полога и связаны со скоростью функционального процесса обмена энергией и массы, а также широко используются для вычисления поверхностного фотосинтеза, эвапотранспирации и объема первичной продукции (NPP). Последние характеристики позволяют рассчитывать потоки энергии, углерода и воды на поверхности растительного покрова и являются базовыми компонентами биогеохимии растительного сообщества.

Спутниковые технологии оценки указанных выше характеристик достаточно хорошо развиты. Так, например, индекс листовой поверхности определяется по данным наземных (на тестовых площадках) и спутниковых измерений, с учетом параметров структуры и биоразнообразия насаждений [4].

Показатель LAI, рассчитанный для любого региона, обеспечивает оценку FPAR [1,2]: $FPAR = a(1 - e^{-k \cdot LAI})$, где a – константа, оцениваемая в полевых наблюдениях, k – коэффициент ослабления света. Использование NDVI позволяет оценить, например, содержание воды в пологе леса m_v в кг/м² (т.е., фактически, оценить биомассу полога):

$$m_v = \begin{cases} 1,9134(\text{NDVI})^2 - 0,3215(\text{NDVI}) & \text{когда } \text{NDVI} \leq 0,5; \\ 4,2857(\text{NDVI})^2 - 1,5429 & \text{когда } \text{NDVI} > 0,5. \end{cases}$$

Разработано большое количество моделей фотосинтеза и расчета первичной продукции леса [1,2], которые в качестве исходных данных используют не биометрические характеристики лесной экосистемы, а данные спутниковых измерений в оптическом, ближнем инфракрасном и, частично, в микроволновом диапазоне волн. Наибольшее применение в моделях находят следующие параметры.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – показатель относительной яркости растительного полог в видимом и ближнем ИК диапазоне:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \cdot \text{LAI}$$

(Leaf Area Index) – показатель важного структурного

свойства растительного полога, отражающего долю площади лиственного покрова на единице площади территории, занимаемой растительностью. К сожалению, известные методы оценки LAI по данным дистанционных измерений дают сильно расходящиеся результаты. Это связано с тем, что площадь листьев или хвои сильно изменяется в течение года и является функцией многих параметров окружающей среды. Среднегодовой ход LAI для лиственных деревьев достигает максимума в течение высшей точки сезона роста, в тоже время LAI для хвойных деревьев изменяется слабо от года к году. Некоторые лиственные деревья сохраняют старые листья вплоть до следующего сезона бутонизации, в то время как другие деревья полностью сбрасывают их. В результате возникает несоответствие между смыслом LAI в этих ситуациях. С одной стороны, старые листья помогают задерживать воду, и с них она может испаряться, но с другой стороны, они не участвуют в фотосинтезе. Поэтому полный индекс площади листа L_T складывается из индекса площади отмерших листьев L_d , индекса площади зеленых листьев L_e и индекса площади сучьев L_s : $L_T = L_d + L_e + L_s$

FPAR (Fraction of Photosynthetically Active radiation) – доля доступной радиации в фотосинтетически активном диапазоне волн (400-700 нм), которая поглощается растительным пологом. Здесь вводятся различные детализации типа (absorbed PAR). APAR - поглощенная зеленым пологом, почвой и подстилкой энергия солнца в процессе фотосинтеза. Оценка APAR дистанционными методами достигается за счет измерения падающей энергии на поверхность Земли и её части, перехваченной пологом.

SI (Scattering index), SIL (scattering index over land) – характеристики рассеянности полога леса.

SR (Simple Ratio), RSR (Reduced Simple Ratio)- характеристики растительного покрова, аналогичные NDVI, рассчитываемые по измерениям со спутников Landsat.

SVI (Spectral Vegetation Index) – параметр, который обобщает спектральный образ растительного полога, характеризуя состояние его зеленой биомассы.

GVI (Global Vegetation Index) – показатель состояния растительных покровов с разрешением 20 км × 20 км, рассчитываемый по данным спутников NOAA и усредненных за сутки данных глобальной базы данных, имеющей пространственное разрешение 4 км × 4 км.

EVI (Enhanced Vegetation Index) – усовершенствованный вариант NDVI, который рассчитывается по формуле:

$$EVI = \frac{r_{IR} - r_R}{r_{IR} + C_1 r_R - C_2 r_B + L} (1 + L),$$

где r_{IR} , r_R и r_B – коэффициенты спектральной яркости в ближней инфракрасной (0,840-0,876 мкм), красной (0,620-0,670 мкм) и голубой (0,459-0,479 мкм) зонах; L – корректирующий коэффициент для учета характера подстилающей растительность поверхности (≈ 1); C_1 (≈ 6) и C_2 ($\approx 7,5$) – коэффициенты, регулирующие степень использования голубой спектральной зоны в атмосферной коррекции красной спектральной зоны.

WDVI (Weighted Difference Vegetation Index), IWDVI (Inverse WDVI) – показатели плотности растительного покрова, числа листовых слоев и количества компонент почвы, различаемых сенсором. Рассчитываются по формулам:

$$WDVI = r_{NIR} - g r_{Red}, \quad IWDVI = r_{Red} - g r_{NIR},$$

где g – наклон поверхности, r_{NIR} и r_{Red} – спектральная яркость в ближнем инфракрасном и красном диапазонах соответственно.

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). Данные радиолокационного зондирования содержат ценные сведения о биофизических параметрах лесных экосистем. Это обусловлено тем, что обратно рассеянный от леса радиолокационный сигнал существенно зависит от диэлектрических свойств растительной среды и подстилающей почвы, геометрии растительного слоя и шероховатости почвенного покрова, влажности почвы и наличия на ее поверхности воды или снега.

По радиолокационным данным оцениваются следующие биофизические параметры:

- плотность растительности;
- высота леса;
- диаметр стволов;
- запас древесины;
- плотность древостоя;
- листовой индекс;
- влагосодержание;
- доминирующая ориентация отражателей (листьев, ветвей, стволов).

Для повышения эффективности интерпретации радиолокационных данных целесообразно одновременно с радиолокационной съемкой проводить съемку поверхности другими системами зондирования (например, оптическими), а также использовать данные наземных измерений.

Основным количественным параметром при анализе радиолокационных изображений является удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР) каждого элемента изображения, обозначаемая символом σ^0 . Возможности анализа могут быть расширены за счёт совместной обработки снимков, снятых в разные дни

(разновременные наблюдения) и/или на разных частотах (многочастотные наблюдения). Разновременные наблюдения, сделанные с близких в пространстве траекторий носителя, позволяют также проводить интерферометрическую обработку пар изображений. Наиболее полной характеристикой зондируемого объекта является его матрица рассеяния, содержащая сведения об амплитуде и фазе рассеянного сигнала для разных сочетаний поляризация на излучении и приёме. Поляризационные измерения позволяют провести более точную классификацию типов подстилающей поверхности, а поляриметрическая интерферометрия даёт информацию о структуре и свойствах кроны. Каждый из этих способов успешно используется для оценки состояния лесной растительности.

Начальным этапом в проведении тематической обработки данных дистанционного зондирования является классификация типов рассеивающей поверхности, выделение областей, покрытых растительностью, определение видов растительности и проведение границ биотических сообществ. Особенно актуальной задача проведения границ лесов становится в тех регионах, где эта граница подвержена активным изменениям в результате различных естественных и антропогенных процессов. В зоне тропических лесов, например, площадь леса уменьшается вследствие вырубок под плантации. Возможности построения карт обезлесивания по данным радиолокационной съемки продемонстрированы в работах [5,6]. В [7] показана возможность мониторинга из космоса обезлесивания во влажных экваториальных лесах.

Множество работ, посвящённых классификации лесных сообществ, анализируют возможности различных частотных диапазонов. В частности, в [8] продемонстрировано применение поляриметрического многочастотного спутникового радара SIR C/X SAR для классификации растительности в двух районах Германии. Для сравнения проведено картографирование в оптическом диапазоне с помощью Landsat TM. Данные PCA были декодированы, привязаны к местности, получены значения УЭПР σ^0 в X-, C- и L-диапазонах. Получено 5 классов лесов: лиственный лес, хвойный лес, подрост, смешанный лес, погибший лес. Сравнение точности классификации показало, что максимальная точность получается при совместном использовании оптических и радиолокационных данных.

Возможно проведение классификации с использованием последовательности изображений одного и того же района, полученных в разное время. В работе [9] рассмотрена применимость данных ERS SAR для картографирования и мониторинга лесов на севере России. Данные были получены во время съемок в сентябре 1994 г., марте 1995 г., октябре 1998 г. Визуальный анализ многовременных изображений в псевдоцвете позволил ясно разделить лес и безлесные территории. Определение мест вырубок и пожаров затруднено, так как они могут быть смешаны с лесами на территории с повышенной влажностью почв. Классификация типов лесов по данным зондирования в C-диапазоне оказалась возможна при условии привлечения дополнительных, наземных данных.

Важнейшим параметром, описывающим функционирование экосистемы, является биомасса растительности, приходящаяся на единицу площади. Оценки биомассы с использованием данных оптического диапазона затруднены из-за эффекта насыщения зависимости отраженного сигнала от величины биомассы при низких уровнях биомассы. В радиодиапазоне насыщение указанной зависимости достигается при значительно больших значениях биомассы. По измерениям в C-диапазоне можно определять биомассу растительности до 10 т/га, а в L-диапазоне до 100 т/га. Данные этих измерений позволяют определить биомассу лугов и посе-

вов, а также молодых лесов и кустарников. Наиболее пригоден для определения биомассы лесов Р-диапазон, так как рассеянная в этом диапазоне мощность определяется плотностью стволов и больших ветвей. При измерении на горизонтальной поляризации в Р-диапазоне можно определять биомассу до 500 т/га и выше [10].

Мониторинг последствий лесных пожаров проводится при помощи оценки динамики значений УЭПР, а также на основе интерферометрической когерентности [11-14].

Радиолокационная интерферометрия — один из современных методов обработки пар изображений, снятых с близких траекторий носителя. В результате возможно получение цифровых моделей рельефа, а также детектирование перемещений участков земной поверхности и оценка величины смещения. В случае исследования лесных сообществ наиболее продуктивна поляриметрическая интерферометрия [15], поскольку последняя позволяет получить информацию о высотной структуре леса. Разнообразные модели рассеяния, используемые для интерпретации данных поляриметрической интерферометрии, позволяют разделить вклады в интерферометрическую фазу объёмного и поверхностного рассеяния, оценить такие параметры растительности, как высота и плотность растительной массы. Одним из способов извлечения высоты растительности из полнополяриметрических данных является использование базиса Паули [16]. Стандартный HV-базис также подходит для извлечения примерной высоты растительности [17]. Высота лесных массивов, тем или иным способом полученная из данных поляриметрической интерферометрии, является необходимым параметром для оценки биомассы [18]. Однако для этого метода оценки биомассы необходимы не только данные дистанционного зондирования, но и наземная информация: видовой состав деревьев, их средний возраст.

Модель комплексной когерентности [19] в качестве одного из параметров включает высоту слоя объёмного рассеяния (которую соотносят обыкновенно с высотой растительности), топографическую фазу (перепады рельефа под пологом растительности), коэффициент объёмного поглощения сигнала и отношение поверхностного рассеяния к объёмному. Поляриметрические данные дополняют традиционную интерферометрию необходимым количеством измерений для того, чтобы эту модель можно было обратить и из величины комплексной когерентности на различных поляризациях извлечь высоту. Следует отметить, что для корректной интерпретации оптимальной когерентности важен выбор частоты. В [20] использованы данные L-диапазона, являющиеся оптимальными для исследования лесов. Более короткие волны почти полностью отражаются от кроны и с меньшей вероятностью достигают земли, а для более длинных, наоборот, крона является почти прозрачной, и сигнал является источником информации только о поверхности, на которой растёт лес.

Задача выбора оптимальной частоты для извлечения параметров растительности исследована в работе [21]. Главным параметром для прикладных задач является высота растительности. Существует область частот, оптимальная для извлечения этого параметра. Так, для кукурузы высота определяется с точностью до 10% в полосе частот 2–5 ГГц (реальная высота — 1,8 м), а для молодой сосны той же высоты диапазон допустимых частот меньше: 1.8–2.8 ГГц. При выборе частоты следует учитывать также следующий факт: чем ниже частота, тем меньше коэффициент поглощения σ , и тем легче учитывать его в модели. Так, для Р-диапазона σ составляет 0.05 дБ/м, для L-диапазона 0.1 дБ/м, для С-диапазона 0.5 дБ/м [22,23].

Проведенный анализ указывает на значимость радиолокационных наблюдений для мониторинга лесов. Дальнейшее развитие применения радиолокационной съемки для данной задачи 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 космической съемки, позволяющим оценивать указанные параметры, является микроволновая радиометрия. Именно поэтому одним из первых научных спутников, запускаемых в России в рамках Федеральной космической программы, является спутник с микроволновым радиометром разработки СКБ ИРЭ РАН.

Ввиду сложной пространственной структуры моделирование микроволнового излучения леса является сложной задачей. В настоящее время используется несколько моделей, которые основываются либо на теоретическом рассмотрении взаимодействия электромагнитных волн с растительностью, либо являются эмпирическими, основанными на регрессионном анализе экспериментальных данных.

Предложенная в [24] модель учитывает не полную сомкнутость полога леса, что характерно для реального древостоя. В этой модели яркостная температура леса T_b выражается через температуру растительности T , яркостную температуру почвы T_{bs} , коэффициент передачи полога β , альbedo оптически толстого полога ω и сомкнутость полога ξ_v (часть поверхности почвы, покрытую пологом):

$$T_b = [T_{bs}\beta + (1 - \omega)(1 - \beta)T]\xi_v + T_{bs}(1 - \xi_v).$$

Данная модель физически обоснована [25], является простой для расчетов. Параметры модели имеют четкий физический смысл. В частности, коэффициент передачи полога оценивается соотношением:

$$\beta = e^{-2\tau},$$

интегральное ослабление микроволнового излучения в пологе τ пропорционально содержанию воды в пологе на единицу площади W :

$$\tau = bW,$$

где коэффициент b определяется типом леса.

Данная модель используется для расчетов яркостной температуры леса при моделировании яркостной температуры земной поверхности в глобальном масштабе [26,27] с пространственным разрешением, соответствующим разрешению спутниковых радиометрических систем дециметрового диапазона (длина волны 21 см). Параметры модели, использованные при расчетах, указаны в таблице 3.

Таблица 3.

Параметры растительного покрова, используемые при глобальном моделировании яркостной температуры для волны 21 см.

<i>Тип покрова</i>	ω	b (м ² кг ⁻¹)	W (кг м ⁻²)
Трава	0.05	0.20	0.5 LAI
Посевы	0.05	0.15	0.5 LAI
Тропический лес	0.15	0.33	6
Лиственный лес	0.15	0.33	4
Хвойный лес	0.15	0.33	3

Проведенный в [27] 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 30 К и более, что говорит о возможности использования данных микроволнового зондирования для оценки влажности почвы [26].

Рассматриваемая модель использовалась и в ряде других работ при расчетах яркостной температуры леса при спутниковых наблюдениях [28,29]. Однако в этих работах использовалось более реалистичное значение $\omega = 0.04-0.05$.

Обзор экспериментальных исследований микроволнового излучения леса дан в [30]. В данном обзоре отсутствуют сведения об аналогичных исследованиях, проведенных в России. Эти данные приведены в [28] и обобщены в [25]. Представление об яркостных характеристиках лесных экосистем дает таблица 4.

Таблица 4.

Экспериментальные данные о характеристиках микроволнового излучения лесов.

<i>Регион, тип леса, носитель аппаратуры</i>	<i>Дата</i>	<i>Длина волны, см</i>	<i>Пространственное разрешение, м</i>	<i>Коэффициент излучения</i>	<i>Яркостная температура, К</i>
Красноярский край, хвойный лес, ИЛ-18	1974-1976	10, 20, 30	100-200	0.93; 0.9; 0.84	
Владимирская область, лиственный лес, АН-2	4 июля 1984 г.	30	35-100	0.85-0.92	248-259
Калужская область, смешанный лес, вертолет КА-26	10 октября 1990 г.	27	140	0.81-0.91	224-251
Беларусь, смешанный лес, вертолет МИ-2	5 сентября 1991 г.	27	70	0.87-0.92	250-264
Бавария, смешанный лес, D-228	6 ноября 1992 г.	21	200	0.83-0.9	235-260
Тверская область, смешанный лес, АН-2	14 мая 1993 г.	21	2000	0.81-0.9	235-260
Московская область, смешанный лес, АН-2	23 сентября 1994 г.	21	150	0.83-0.93	240-273
Южная Франция	Май-август 1994 г.	6		0.94-0.98	
Таскания, широколиственный лес, ARAT (Fokker-27)	15-16 и 24-25 июня, 1999 г.	21	100	0.913-0.945	

Анализ известных теоретических и экспериментальных данных показывает, что микроволновая радиометрия является эффективным инструментом для мониторинга характеристик почвы и растительности в лесах.

Особый интерес представляет использование долговременных рядов наблюдений яркостных характеристик лесов в микроволновом диапазоне и их статистическая обработка. Несколько работ посвящено оценке пожароопасности лесов по данным радиометрических измерений. По Нестерову [31], существует четыре уровня пожароопасности лесов, характеризующихся влажностью горючих материалов (подстилка, мох и пр.). Данные экспериментов [32,33] показывают, что среднее значение яркостной температуры леса меняется незначительно при переходе от низкого уровня пожарной опасности к экстремально высокому уровню. Однако при этом среднеквадратичное отклонение вариаций яркостной температуры изменяется в 6-8 раз. В работе [34] рассчитаны и измерены среднеквадратичные отклонения вариаций яркостной температуры на длине волны 2,25 см при различных уровнях пожароопасности леса. Показано, что отношение $\sigma / \Delta T_{b(f-w)}$, где σ – дисперсия вариаций яркостной температуры, а $\Delta T_{b(f-w)}$ – среднее значение яркостного контраста между излучением леса и гладкой водной поверхностью уменьшается существенно с увеличением пожароопасности в лесу. При низком уровне пожароопасности это отношение больше 0,1, при экстремально высоком уровне пожароопасности это отношение меньше 0,03.

При зондировании со спутника вариации яркостной температуры сглаживаются. Тем не менее, в работе [35] показано, что уровень этих вариаций по-прежнему может служить индикатором пожарной опасности в лесу. Экспериментальные данные, полученные радиометром SSM/I за апрель-сентябрь 1988-1990, 1992, 1994, 1997, 1998 гг. на частотах 85, 37, 22.235 и 19.35 ГГц, были обработаны для четырех лесных территорий размером $1^\circ \times 1^\circ$ в Америке (Аляска и Оклахома) и России (Московская область и Сибирь). Для оценки головной и сезонной изменчивости яркостной температуры использовалась величина $\delta = \bar{\sigma} / \bar{T}_b$, названная коэффициентом вариаций, где $\bar{\sigma}$ – усредненное за месяц значение среднеквадратичного отклонения вариаций яркостной температуры для данной территории, – среднее значение яркостной температуры территории за тот же период. Как оказалось, имеется сильная корреляция между средним значением яркостной температуры и температурой воздуха и лесного полога. Однако \bar{T}_b практически не связано с уровнем пожарной опасности, что согласуется с данными полученными в предшествующих работах. Уровень пожарной опасности оценивался в работе по метеорологическим данным. Для непрямых оценок этого уровня использовался комплексный метеорологический индекс, который является функцией от дневных температур, осадков и точки росы. Оказалось, что сезонные зависимости коэффициента вариаций δ , полученные для различных частотных каналов SMM/I, сходны. С мая по сентябрь величина δ изменяется в пределах 0.008-0.048. Отмечено, что максимальные значения комплексного метеорологического индекса, соответствующие высокой пожарной опасности, совпадают с минимальными значениями δ и наоборот.

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 5. Данный перечень является обобщением результатов анализа, проведенного в разделах 1 и 2.

Таблица 5.

Основные индикативные характеристики лесных экосистем и требования по их определению.

<i>Характеристика</i>	<i>Требуемое пространственное разрешение</i>	<i>Требуемая периодичность определения</i>
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: альbedo; 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 6.

Таблица 6.

Виды и характеристики дистанционной съемки при экологическом мониторинге лесов.

<i>Вид дистанционной съемки</i>	<i>Задачи, решаемые с использованием данного вида съемки</i>	<i>Российские спутники, способные осуществлять данный вид съемки</i>	<i>Зарубежные спутники, способные осуществлять данный вид съемки</i>
Панхроматическая съемка с высоким линейным пространственным разрешением. Мультиспектральная съемка в видимом и ближнем ИК диапазоне 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 съемка 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.	Запущен радиометр L-диапазона на МКС	Aqua (AMSR-E), SMOS

Из данных таблицы 6 следует, что у Российской Федерации в настоящее время на орбите имеется малое количество космических аппаратов, способных предоставить информацию, требуемую для решения задач экологического мониторинга окружающей среды вообще и лесных территорий, в частности. Запуск таких космических аппаратов, запланированный в рамках Федеральной космической программы, затягивается.

В то же время имеется широкий спектр коммерческих и научных иностранных спутников, предоставляющих требуемую информацию на коммерческой или безвозмездной основе. В связи с этим, 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.

Из данных таблицы 6 следует, что у Российской Федерации в настоящее время на орбите имеется малое количество космических аппаратов, способных предоставить информацию, требуемую для решения задач экологического мониторинга окружающей среды вообще и лесных территорий, в частности. Запуск таких космических аппаратов, запланированный в рамках Федеральной космической программы, затягивается.

Заключение

На основе рассмотрения отечественного и мирового опыта экологического и лесопатологического мониторинга лесов, а также анализа глобальных климатических моделей определены характеристики лесных экосистем и характеристики проходящих в них процессов (индикативные характеристики), которые определяют влияние лесных экосистем на климатические изменения и которые в наибольшей степени подвержены влиянию климатических изменений.

Проведен анализ возможностей определения индикативных характеристик по данным дистанционного зондирования в оптическом и радиодиапазоне. Выявлены основные характеристики лесных экосистем, которые могут оцениваться по данным дистанционной космической съемки. Определены виды и характеристики космических съемок лесных экосистем, требуемые для мониторинга взаимного влияния функционирования лесных экосистем и климатических изменений.

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

В данной работе впервые предлагается использование для решения поставленной задачи кроме традиционных радиолокационных данных данные микроволно-

вых (L-диапазон) радиометрических измерений из космоса. Возможность эффективного использования этих данных для контроля, например, гидрологического состояния территорий убедительно показана в работах, проведенных в ФИРЭ РАН с использованием самолетов-лабораторий. Ранее космические аппараты с микроволновыми радиометрами L-диапазона не запускались. Однако в настоящее время Европейским космическим агентством осуществлен запуск аппарата SMOS с радиометром L-диапазона. Аппарат проходит полетные испытания, научное использование данных начнется в середине 2011 года. В России осуществлен запуск микроволнового радиометра L-диапазона производства СКБ ИРЭ на международной космической станции, а в ближайшее время планируется запуск такого радиометра на специализированном спутнике. Разработка алгоритмов использования данных микроволновой радиометрической съемки из космоса позволит эффективно использовать аппаратуру, размещаемую как на международной станции, так и на спутнике. Разработка алгоритмов совместной обработки микроволновых радиометрических данных с данными оптической съемки и радиолокационными данными открывает новые перспективы в экологическом мониторинге территорий.

Литература

1. *Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Varotsos C.A.* Global Carbon Cycle and Climate Change // Chichester, UK: Springer/Praxis, 2008.- 561 pp.
2. *Бурков В.Д., Крaпивин В.Ф.* Экоинформатика // М: ГОУ ИПО МГУЛ, 2009. - 432 с.
3. *Бартaлев 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.
4. *Wulder M.A. and Franklin S.E.* eds. Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies // Boston: Kluwer Academic, 2003. - 519 pp.
5. *Suga Y. and Takeuchi S.* Application of JERS-1 InSAR for Monitoring Deforestation of Tropical Rain Forest // Proceeding of IGARSS'2000. Honolulu. 2000.- P. 432-434.
6. *Bijker W. and Hoekman D.* A remote sensing monitoring system for a settlement area in tropical rains forest // Proceedings of IGARSS'94. Pasadena. 1994.- P. 97-99.
7. *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.
8. *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.
9. *Dontchenko V. V., Johannessen O. M., Bobylev L. P., and Bartalev S. A.* ERS/SAR data application for Russian boreal forest mapping and monitoring // Proceedings of IGARSS'99, Hamburg. 1999.- P. 1652-1654.
10. *Le Toan T., Beaudoin A., Riou J., Guyon D.* Relating Forest Biomass to SAR Data // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing.- 1992.- V.30. No.2.- P. 403-411.
11. *Bourgeau-Chavez, L.L., Kasischke, E.S., French, N.H.F., Szeito, 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

12. French N. H. F., Kasischke E. S., Bourgeau-Chavez L. L., Harrell P. A., and Christensen N. M. Jr. Relating soil water measurements at fire disturbed sites in Alaska to ERS-1 SAR image signature // Proceedings of IGARSS'94. Pasadena. 1994. - P. 246-248.
13. Counturier S., Liew S. Ch., Nakayama M., Lim H. Monitoring vegetation regeneration in fire-affected tropical forests using ERS/JERS synthetic aperture radar // Proceedings of IGARSS'99, Hamburg. 1999. - P. 717-719.
14. Silgert R. F. and Nakayama M. Comparison of ERS-2 and JERS for fire impact assessment in tropical rainforests // Proceeding of IGARSS'2000. Honolulu. 2000.- P. 2709-2711.
15. 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.
16. Lopez-Sanchez J. M., Fortuny J., Sieber A. J., Sagues L., Bara M., Fabregas X., and Broquetas A. Experimental Comparison of Different Scattering Mechanism Selections for Vegetation Height Retrieval by POLINT // Proceeding of IGARSS'2000. Honolulu. 2000. - P. 138-140.
17. Shimada M., Muhtar Q., Tadono T., Wakabayashi H. Tree height estimation using an airborne L-band polarimetric interferometric SAR // Proceeding of IGARSS'2001. Sydney. 2001.- P. 1430-1432.
18. Mette T., Papathanassiou K.P., Hajnsek I., and Zimmermann R. Forest Biomass Estimation using Polarimetric SAR Interferometry // Proceeding of IGARSS'2002. Toronto. 2002.- P. 817-819.
19. Papathanassiou K.P., Reigber A., and Cloude S.R. Vegetation and Ground Parameter Estimation using Polarimetric Interferometry. Parts I, II. // Proc. of the CEOS SAR Workshop. Toulouse. 1999.- P. 347-358.
20. Siebler O., Brodbeck R., Pasquali P., and Niesch D. Multibaseline POL-InSAR experiment for the estimation of the scattering processes and their spatial distribution within vegetation layers // Proceeding of IGARSS'2000. Honolulu. 2000.- P. 132-134.
21. Ulbricht A., Fabregas X., Sagues L. Applying polarimetric interferometric methods to invert vegetation parameters from SAR data // Proceeding of IGARSS'2001. Sydney. 2001.- P. 1424-1426.
22. Cloude S.R., Papathanassiou K.P., Reigber A. Polarimetric SAR Interferometry at P-band for Vegetation Structure Extraction // Proceedings of EUSAR-2000. Munich.- P. 249-252.
23. Cloude S. R., Papathanassiou K. P., Reigber A., Boerner W.M. Multi-Frequency Polarimetric SAR Interferometry for Vegetation Structure Extraction // Proceeding of IGARSS'2000. Honolulu. 2000.- P.129-1314.
24. 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.
25. Chukhlantsev A.A. Microwave Radiometry of Vegetation Canopies // Dordrecht, Netherlands: Springer, 2006.- 287 pp.
26. Pellarin T., Calvet J.-C., and Wigneron J.-P. Surface soil moisture retrieval from L-band radiometry: A global regression study // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2003.- V. 41.- P. 2037-2051.

27. *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.

28. *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.

29. *Grankov A.G., Milshin A.A., and Chukhlantsev A.A.* Modeling microwave emission from forests in satellite observations // *Proc. of the Sixth International Symposium "Ecoinformatics Problems", Moscow, 1-3 December 2004*, Moscow: IRE RAS, 2004.- P. 38-42.

30. *Pampaloni P.* Microwave radiometry of forests // *Waves in Random Media*, 2004.- V.14.- P. S275-S298.

31. *Нестеров В.Г.* Пожароопасность в лесу и методы ее определения // М.-Л.: Гослесбумиздат. 1949.

32. *Кирдяшев К.П.* О стабильности полей радиояркостной температуры естественных объектов // *Труды конференции «Статистические методы в дистанционном зондировании»*, Сент. 1980, Минск. М.: ИПЭ, 1983.- С. 13-16.

33. *Валендик Е.М., Кисляков Е.К., Сухинин А.И.* Оценка пожароопасности леса по данным СВЧ радиометрическим измерений // *Исследование Земли из космоса*, 1980. - № 3.- С. 14-19.

34. *Кирдяшев К.П., Саворский В.П.* Статистические оценки пожароопасности леса по данным СВЧ радиометрических измерений // *Радиотехника и электроника*, 1986.- Т. 31.- С. 1239-1241.

35. *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.