

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 502/504:001

ТЕХНОЛОГИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ

Д-р физ.-мат. наук, проф. **В.Ф. Крапивин**,
д-р физ.-мат. наук, проф. **Ф.А. Мкртчян**
(Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва)

REMOTE SENSING TECHNOLOGY OF GEOINFORMATION MONITORING

V.F. Krapivin, F.A. Mkrtchyan

Ключевые слова: модель, микроволновое излучение, наземная экосистема, температура, углерод, биосфера, дистанционный мониторинг.

Key words: model, microwave emission, land ecosystem, temperature, carbon, biosphere, remote monitoring.

Обсуждены вопросы дистанционного мониторинга объектов окружающей среды. Основное внимание обращено на микроволновый диапазон электромагнитных излучений. Охарактеризованы теоретические основы радиофизического зондирования наземных экосистем и температурных аномалий на земной поверхности. Рассмотрена микроволновая модель лесного покрова как слоистой среды. Указаны взаимосвязи глобальных процессов в системе климат-биосфера-общество. Отмечены особенности биогеохимических циклов парниковых газов. Данная работа выполнена в рамках госзадания №0030-2015-0195.

The questions of remote sensing monitoring of the environment are discussed. Basic attention is noticed to microwave electromagnetic emissions. Theoretical bases of radiophysical sensing are characterized to be as tools for the monitoring of land ecosystems and temperature anomalies on the land surface. Microwave model of the forest cover as layered media is considered. Correlations between global environmental processes within the climate-biosphere-society system are shown. Features of the biogeochemical cycles of greenhouse gases are marked.

Введение

Дистанционное зондирование является важным средством картирования почвенно-растительных формаций и решения многих прикладных задач ландшафтной экологии. Наибольшие достижения достигнуты в получении оперативной информации со спутников и летающих лабораторий, оборудование которых позволяет поставлять данные о пространственной структуре земных покровов с достаточно большим разрешением по поверхности и во времени. Характеристики пространственного и временного разрешения зависят от используемых сенсоров.

Наиболее развитыми являются оптические устройства, пространственное разрешение которых может достигать единиц метра. Благодаря применению много-спектральных сенсоров оптического диапазона, обеспечивающих спектральное разрешение менее 10 нм, созданы карты спектральных образов растительных покровов в диапазоне от 400 нм до 2500 нм. Ясно, что спектральный образ зависит от биохимического состава растительности, характеристик листвы, концентрации пигментов, структуры полога и многих других параметров. На основе различия спектральных образов создаются алгоритмы классификации растительных покровов, как правило, основанные на процедурах различения гипотез. Основные нерешенные задачи в этой области связаны с преодолением шумов, вызванных атмосферой (облачность, пыль, задымленность). Одним из методов преодоления возникающих трудностей является переход на микроволновый диапазон, волны которого не подвержены таким искажениям, как оптические волны, но проигрывают в пространственном разрешении.

Современные системы сбора спутниковых данных обеспечивают различные уровни пространственного разрешения, что позволило развить эффективные технологии тематического анализа, включая:

- Картографирование лесов с указанием их возрастной структуры и классификацией категорий лесных земель.
- Оценку фенологической динамики лесных экосистем с выявлением крупномасштабных изменений в лесах и расчетом долговременных трендов их состояния.
- Оценку биофизических характеристик лесов, таких как биомассу, продуктивность и площадь листовой поверхности.

Дистанционная диагностика окружающей среды СВЧ-радиофизическими методами

Дистанционное зондирование земных покровов, атмосферы и акваторий Мирового океана основано на регистрации собственного или отраженного и рассеянного электромагнитного излучения. Возможность получения информации о свойствах элементов окружающей среды связана с теми обстоятельствами, что характер собственного (теплого) излучения, механизмы рассеяния и отражения активных излучений являются функциями физических и геометрических свойств этих элементов.

Волны (или частоты) электромагнитного излучения, используемые для дистанционного зондирования в системах мониторинга окружающей среды, занимают широкий участок спектра от 0,3 мкм до 1,3 м. с разбиением на поддиапазоны: ближний ультрафиолетовый (0,3 -мкм), видимый (0,4 – 0,76 мкм), ближний инфракрасный (ИК, 0,76 -мкм), средний и дальний ИК (1,5 мкм - 1 мм), сверхвысокочастотный (СВЧ, 1 мм – 1,3 м). СВЧ диапазон принято делить на три основных поддиапазона: миллиметровый (1 - 10 мм), сантиметровый (1 - 10 см) и дециметровый (10 - 130 см). В зарубежной литературе широко используются два СВЧ поддиапазона, которые принято называть как L-диапазон (15,8 - 63 см) и P-диапазон (63 - 100 см) [1,8,16].

Реальный участок спектра, выбираемый для изучения объекта окружающей среды, определяется многими обстоятельствами, такими как поглощение и рассеяние электромагнитных волн атмосферой Земли, а также их взаимодействие с земными покровами и водными объектами. Атмосфера является чрезвычайно

ограничивающим фактором для выбора рабочего диапазона в задачах дистанционного мониторинга. Например, в принципе диапазон декаметровых волн может применяться для глубинного зондирования с использованием самолетов-лабораторий, но его применение затруднено в космических системах из-за того, что земная ионосфера является экраном этих волн. Аналогичная ситуация имеет место в случае ультрафиолетового излучения, которое интенсивно поглощается газами атмосферы. Другими словами, возникает вопрос о прозрачности атмосферы в конкретном диапазоне длин волн. Так, например, некоторые волны инфракрасного и субмиллиметрового диапазонов волн интенсивно поглощаются парами воды, что практически исключает их из рассмотрения в качестве «инструмента» дистанционного зондирования. Облака сильно ослабляют световое излучение и препятствуют наблюдению земной поверхности из космоса на многих территориях.

Знание функции пропускания атмосферы в конкретных синоптических и географических условиях является ключевой задачей при синтезе систем дистанционного мониторинга. Как правило, эта задача решается в процессе проведения измерений. Для этого к основным каналам излучений присоединяют один или несколько каналов, использующих волны, которые относительно сильно поглощаются или рассеиваются различными компонентами атмосферы. По эффекту ослабления этих волн определяется содержание соответствующего компонента на различных высотах (или интегральное содержание, в зависимости от задачи). На основе этих дополнительных данных вводится поправка в результаты измерений по основным каналам.

Указанные физические особенности дистанционного зондирования окружающей среды присущи СВЧ и УКВ диапазонам волн, составляющих основу радиофизических систем геоинформационного мониторинга. Использование этих систем позволило решить многие задачи оперативной идентификации природных явлений и развить новые методики и технологии дистанционной диагностики природных и природно-техногенных систем окружающей среды.

Радиофизические методы условно делятся на два класса: активные и пассивные. Под активными понимаются методы, изучающие характер отражения, рассеяния и поглощения волн, излучаемых источником с известной спектральной плотностью. В оптическом диапазоне такими источниками являются Солнце, лазеры и другие световые излучатели. В радиодиапазоне активные методы широко применяются с использованием средств радиолокации. При этом объектом изучения является мощность отраженного и рассеянного излучения, его спектральный состав и поляризационные свойства, фаза и время распространения.

Под пассивными методами понимаются те, которые используют анализ собственного (теплового) излучения природных образований. Здесь принимается во внимание то обстоятельство, что характер собственного излучения определяется как температурой вещества, так и его физическими свойствами. Поэтому пассивные методы применяются как для измерения температуры, так и для определения различных параметров среды. Особенно эффективны эти измерения при многоканальном зондировании, согласованном с алгоритмами обработки данных.

Перейдем теперь к рассмотрению специфики радиофизических методов, т.е. тех методов дистанционного мониторинга, в которых используются радиоволны. При этом основное внимание сосредоточим на волнах СВЧ-диапазона, так как именно этот диапазон широко используется в системах дистанционного зондирования, базирующихся на ИСЗ и самолетах-лабораториях.

Основная специфика радиофизических методов связана с большой радиопрозрачностью атмосферы. В этом их одно из преимуществ по сравнению с оптическими и инфракрасными методами. Возможности последних сильно ограничиваются поглощающими и рассеивающими свойствами атмосферы. Наибольшие “неприятности” здесь приносят облака, которые непрозрачны для этих диапазонов волн и часто препятствуют получению соответствующей информации о состоянии элементов окружающей среды. Это обстоятельство затрудняет оперативное получение данных об изучаемом явлении или объекте, а следовательно нет возможности применять их в таких важных задачах, как диагностика чрезвычайных и катастрофических природных и техногенных аномалий. Конечно, применение приборов оптического и инфракрасного диапазонов возможно лишь в районах с малой облачностью. Следовательно, основное преимущество радиофизических методов дистанционного мониторинга состоит в их всепогодности. Безусловно, и здесь имеются определенные проблемы, над решением которых работают специалисты многих стран. Например, на волне 1,35 см имеется линия поглощения паров воды, а в диапазоне 0,5 см действует полоса поглощения кислорода.

Радиоволны могут проникать под полог растительного покрова и в глубину собственного излучения. Поэтому использование радиофизических методов позволяет оценивать состояние растительности и почвы и определять многие их характеристики.

Теоретические основы радиофизического зондирования

Теоретические аспекты радиофизического мониторинга определяются физической основой организации процедуры измерений в активном или пассивном режимах распространения электромагнитного излучения. Технология активного зондирования базируется на методах радиолокации, а пассивного на регистрации собственного излучения. В обоих случаях теоретические задачи радиофизического мониторинга связаны с изучением условий распространения электромагнитных волн в окружающей среде и, безусловно, в первую очередь, в атмосфере и ближней ионосфере.

В активном режиме речь идет о распространении электромагнитных волн различного диапазона от излучателя к приемнику. Здесь возможны два случая. В первом случае передатчик и приемник разнесены в пространстве и решение об оценке параметров окружающей среды принимается на основе регистрируемых искажений переданного сигнала. Во втором случае передатчик и приемник совмещены, так что оценка параметров окружающей среды делается на основе анализа поглощения излученного сигнала и искажения принятого его отражения. Безусловно, время распространения сигнала в среде также является информативным параметром.

Активная форма радиофизического мониторинга характерна для метода радиопросвечивания атмосферы. Схема реализации таких измерений основана на размещении передатчика на космическом аппарате, вращающемся вокруг Земли, и расположении приемника на геостационарном спутнике. В результате такая структура обеспечивает непрерывный режим вертикального разреза атмосферы и получения высотных распределений ее параметров. Задача сводится к идентификации величин этих параметров по данным о поглощении и флуктуации сигнала при его распространении по изменяющейся трассе между спутниками.

Влияние атмосферы и ионосферы на параметры рефракции, ослабления, флуктуации, поглощения, запаздывания и изменения частоты сигнала хорошо изучено.

Эти эффекты в зависимости от положения орбиты спутника позволяют получать информацию об атмосфере и ионосфере в конкретных районах планеты. Формирование полного пространственного образа части или всей атмосферы реализуется с помощью обработки этой информации методами ГИМС - технологии.

Различают прямую и обратную задачи радиопросвечивания. Прямая задача возникает в случае, когда модель атмосферы известна и нужно определить для данной траектории спутника упомянутые выше изменения электромагнитной волны. Обратная задача состоит в определении параметров атмосферы и ионосферы по экспериментальным данным об указанных вариациях сигнала.

Пассивные методы радиофизического мониторинга основаны на СВЧ-радиометрии. Наличие в СВЧ диапазоне областей резонансного поглощения позволяет проводить дистанционное восстановление метеорологических параметров атмосферы, таких как вертикальные профили температуры и влажности, полная масса водяного пара и водозапас облаков, интенсивность дождя и др. Возможность получения информации не только о характеристиках водной и земной поверхностях, но и о глубинных характеристиках, зависит от выбора диапазона электромагнитного излучения. В инфракрасном диапазоне все излучение формируется в очень тонком поверхностном слое. Электромагнитные волны СВЧ диапазона сильно поглощаются земной и водной поверхностями. Глубина их проникновения в водную среду варьируется от сотых долей до единиц миллиметра. В тоже время в сухих грунтах, материковых льдах и сухом снеге эта величина может достигать нескольких десятков длин волн. Это позволяет осуществлять дистанционные исследования почвы, ледяного и снежного покрова до значительных глубин.

Проникающая способность радиоволн дает преимущество особенно при зондировании непосредственно земных покровов. Неплотная растительность (трава, злаковые и т.п.) в основном слабо поглощает радиоволны и поэтому можно производить сквозь нее “радионаблюдение” почвенных покровов. Радиоволны могут проникать в грунт до глубины порядка одного метра.

Основной недостаток радиофизических методов дистанционного зондирования состоит в сравнительно низкой пространственной разрешающей способности по сравнению с оптическим диапазоном. В радиодиапазоне высокое пространственное разрешение достигается за счет применения многоканальности и специализированных методов обработки данных, что требует больших экономических затрат.

Рассмотрим некоторые аспекты активной локации. Предположим, что осуществляется облучение в надир гладкого участка поверхности Земли. Мощность отраженного от поверхности сигнала будет равна

$$W = pGA | \kappa_0 |^2 (16\pi H^2)^{-1},$$

где p - излучаемая мощность, G - коэффициент направленного действия антенны, A - эффективная площадь антенны, H - высота антенны над земной поверхностью, κ_0 коэффициент отражения от земной поверхности. Если все аппаратные параметры и высота антенны известны, то отношение принятой мощности к полученной определяет величину коэффициента отражения. В случае однородной по глубине почвы он равен $\kappa_0 = (\epsilon^{1/2} - 1) / (\epsilon^{1/2} + 1)$, где ϵ - диэлектрическая проницаемость почвы. Для оценки ϵ существует следующая приближенная формула:

$$\varepsilon = (\varepsilon_w^{1/2} p_w + \varepsilon_s^{1/2} [1 - p_w])^2 \quad (1)$$

где ε_w - диэлектрическая проницаемость воды, p_w относительная объемная концентрация свободной влаги в грунте, $\sqrt{\varepsilon_s} \approx 1 + 0,5\rho_s$ - диэлектрическая проницаемость сухого грунта, ρ_s - плотность сухого грунта ($1 - 2 \text{ г/см}^3$).

Из (1) видно, что по мощности отраженного сигнала можно определить коэффициент отражения, а следовательно и диэлектрическую проницаемость грунта. На основе ε определяется плотность грунта, если он сухой, или влагосодержание, если он влажный.

Диэлектрические свойства земных покровов являются основой применения радиофизических методов для их диагностики в различных состояниях. В частности, знание спектрального коэффициента излучения в миллиметровом диапазоне позволяет оценивать характеристики слоя снега или льда. Коэффициент отражения определяется также и пассивными методами на основе измерений интенсивности радиотеплового излучения. Интенсивность собственного излучения в СВЧ диапазоне в соответствии с приближением Релея-Джинса и законом Кирхгофа характеризуется яркостной температурой

$$T_{\text{я}} = \kappa T_{\text{э}} \quad (2)$$

где κ - коэффициент излучения (или поглощающая способность поверхности или степень черноты), $T_{\text{э}}$ - эффективная температура поверхности. Выражение (5.6) характеризует собственное тепловое излучение поверхности и не учитывает излучения, попадающего на поверхность и отраженного ею. Коэффициент κ описывается с помощью отражательных формул Френеля.

Мощность, регистрируемая полностью согласованным приемником, будет равна $W = \kappa T_{\text{я}} \Delta f$, где Δf - полоса принимаемого излучения. В случае модели грунта с плоской поверхностью коэффициенты излучения и отражения связаны формулой $\kappa = |\kappa_0|^2$. Следовательно, знание коэффициента излучения позволяет оценить коэффициент отражения и электрофизические свойства грунта. При этом необходимо знать температуру T грунта или произвести калибровку радиометра по участкам земных покровов с известными коэффициентами излучения, температура которых совпадает с температурой изучаемого участка. Теоретические положения дистанционных методов, как правило, носят приближенный характер, так как при получении тех или иных формул выдвигаются упрощающие предположения о типе однородности распределения параметров среды по глубине, абсолютной прозрачности среды, гладкости земных покровов и т.п. Создаваемые при этом модели отражают ограниченный спектр особенностей изучаемого явления, а потому всегда требуются оценки их адекватности.

Проблема выбора длин волн и сочетания их диапазонов с классами решаемых задач находится в поле зрения многих исследователей. Теоретическое обоснование этого выбора лежит в области теории радиационного переноса излучения объектами окружающей среды. В частности, для монохроматического случая уравнение переноса излучения имеет вид

$$dI(z)/dz = J(z) - \alpha I(z) \quad (3)$$

где α - коэффициент поглощения, $J(z)$ - распределенный по z источник излучения, $I(z)$ - интенсивность излучения в точке z . При этом для нерассеивающей атмосферы $J(z) = \varepsilon_1(z)B(z)$, где ε_1 - излучательная способность атмосферы,

$$B(z) = (2hf^3/c^2) [\exp\{hf/(kT)\} - 1]^{-1},$$

h , c и k - фундаментальные константы, $f = \nu c$ - частота. В микроволновой части спектра $hf < kT$ и справедлива аппроксимация Релея-Джинса $B(z) = 2kT/\lambda^2$. Здесь $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж К⁻¹ - постоянная Больцмана, λ - длина волны.

Уравнение (3) имеет решение

$$T_{я} = \kappa T_{\ominus} \tau(0, \infty) + \int_0^{\infty} T(u) Q(u) du \quad (4)$$

где

$$\tau(a, b) = \exp\left[-\int_a^b \alpha(z) dz\right],$$

Весовая функция $Q(u) = \partial \tau(u, \infty) / \partial u$ описывает вклад различных атмосферных слоев в принимаемый сигнал. Формула (4) обобщает соотношение (2). Примеры характерных величин $T_{я}$ приведены в табл. 1.

Важным обстоятельством реализации радиофизических измерений является их калибровка. Цель калибровки состоит в приведении измерений в единую систему отсчетов. В пассивном режиме для этого используются реперные объекты с априори известной яркостной температурой. Обычно в качестве таковых выбирают лес или водоемы с пресной водой. При этом яркостная температура леса приравнивается к термодинамической температуре крон деревьев, а яркостная температура водоема рассчитывается в соответствии с известной методикой.

Таблица 1

**Характерные значения яркостных температур
для некоторых земных покровов**

Тип земного покрова	$\lambda = 0,8$ см		$\lambda = 1,35$ см	
	$T_{я, min}$	$T_{я, max}$	$T_{я, min}$	$T_{я, max}$
Пустыня	251	261	245	270
Вспаханная степь	255	268	257	277
Покрытая снегом степь	246	261	241	260
Покрытый снегом лед	247	263	231	253
Лед	239	247	235	254
Морская поверхность	136	171	110	168

Радиофизический мониторинг почвенно-растительных формаций

Дистанционный мониторинг почвенно-растительных формаций нацелен на оценку биологической продуктивности, понимание взаимодействий в системе *почва-растение-атмосфера*, расчет динамики биомов, моделирование биогеохимических циклов с учетом роли растительности, управление растительными ресурсами.

Земные покровы характеризуются большим разнообразием ландшафтов, отличающихся типами почв и грунтов, особенностями водно-солевого и температурного режимов, характером обработки поверхностного слоя на возделываемых землях, видом растительного покрова, особенностями макрорельефа местности. Почва включает в себя твердые частицы, почвенную воду (почвенный раствор) и воздух. Твердые частицы состоят из минеральных и органических веществ. Основную массу большинства почв составляют минеральные вещества (минеральные почвы): частицы размером более 3 мм - каменная часть почвы, частицы от до 1 мм - «физический песок», частицы мельче 0.01 мм - «физическая» глина. Грунтообразующие минералы состоят в основном из окислов SiO_2 и Al_2O_3 . Содержание органических веществ (главным образом гумуса) колеблется в таких почвах от 1 до 10 % по весу. Все эти обстоятельства при синтезе системы мониторинга земных покровов приводят к необходимости выбора информативных каналов радиофизического зондирования. Многочисленные и многолетние исследования в этой области позволили для многих типов растительных покровов и почв указать наиболее эффективные диапазоны волн. Хорошо изученными являются сельскохозяйственные системы, лес и засушливые зоны. Перспективными направлениями в радиофизическом мониторинге леса является контроль гидрологического режима почвы под пологом леса и изучение динамики лесовосстановительного процесса в районах вырубок и лесных пожаров. Эти задачи решаются применением дециметрового диапазона, в котором полог леса прозрачен для СВЧ-волн, а следовательно, возможно зондирование почвы до уровня грунтовых вод.

Возможность инвентаризации древесно-кустарниковой растительности по данным радиолокационного зондирования основывается на связи коэффициентов обратного рассеяния СВЧ-волн со структурой и диэлектрическими свойствами растительности. Использование средств радиолокационной техники в мониторинге лесов обусловлено возможностями получения дополнительной информации в комплексе с дистанционными измерениями в видимом и ИК-диапазонах [5].

Основной задачей спутниковых радиолокаторов при наблюдении за лесом является глобальное картирование растительности в масштабе, определяемом хозяйственными потребностями данного региона. Такие исследования со спутников SEASET (1978), SIR-A (1981) и SIR-B (1984) с помощью локатора диапазона 20 см в Южной Америке, Центральной Африке и Юго-восточной Азии показали, что возможно обнаружение вырубок площадью до 10-15 га и выделение границ лесопокрываемых площадей.

Достижения последних лет в области дистанционного исследования лесокустарниковой растительности стали возможны благодаря сочетанию систем наблюдения, использующих различные диапазоны волн. Например, локатор AN/APQ-96 в ИК-диапазоне успешно классифицирует типы растительных покровов, радиолокатор Goodyear с синтезированной апертурой имеет разрешение 10-15 м и позволяет определять типы почвенно-растительных формаций, многоканальный локатор SAR-580 (ERIMX-LSRR) с разрешением около 2 м распознает хвойные и лиственные леса, а также кустарники. Совмещение оптического диапа-

зона с СВЧ-диапазоном (3см, 5см, 10 см и 23 см) дает возможность классифицировать состояния регенерации сгоревшего лесного массива. На радиоизображениях видно, что области с мертвым лесом имеют низкую отражательную способность. Это связано с сильным поглощением радиоволн диапазона 10 см в стволах погибших деревьев. Радиоизображения, полученные на перекрестной поляризации, дают возможность отличить изображения восстанавливаемого и зрелого леса. Изображения сухостоя обычно темнее, чем для вырубленного леса.

Охрана лесов от пожаров является одним из направлений развития дистанционных методов мониторинга состояния растительных покровов. Современные спутниковые и самолетные системы дистанционного мониторинга типа JERS-1 и NOAA/AVHRR позволяют решать такие задачи, как:

- оперативная оценка степени пожарной опасности леса;
- картирование обводненности лесных территорий при тушении крупных лесных пожаров;
- картирование контуров лесных пожаров через слой дыма и полог древостоя;
- определение энергетических параметров пожара;
- определение после пожарного состояния лесов.

Исследование радиотеплового излучения естественных слоев лесных горючих материалов из лишайника, мхов, травяной ветоши, отмершей хвои и кустарников позволили построить методику идентификации параметров лесного пожара при измерении радиотеплового излучения в СВЧ диапазоне электромагнитных волн. На рис. 1 и 2 приведены образцы регистрации с борта самолета-лаборатории ИЛ-18 яркостной температуры в зоне лесного пожара. Здесь четко различаются фронт и тыл пожара и прогоревшая часть леса.

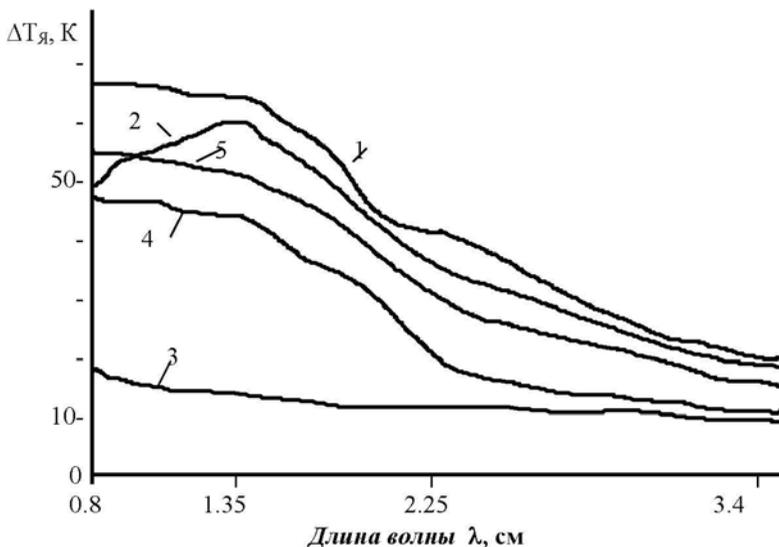


Рис. 1. Усредненный спектр радиояркостных контрастов для отдельных элементов лесного пожара. 1- зона задымления; 2- фронт; 3- прогоревшая зона; 4- тыл; 5- граница между фронтом и прогоревшей зоной.

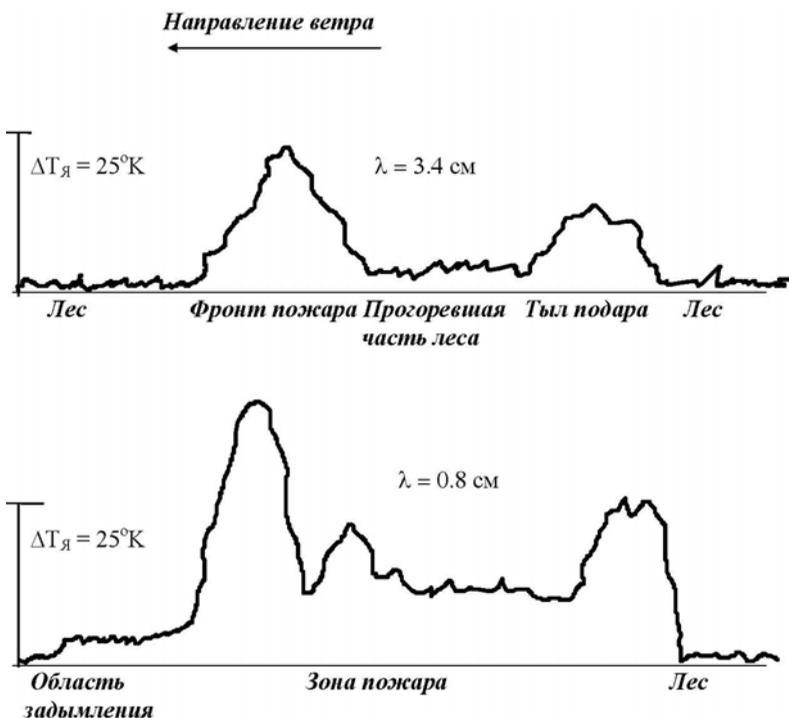


Рис. 2. Фрагмент регистрограммы радиоярких контрастов в зоне лесного пожара под Красноярском.

Сопоставление радиоярких температур на различных длинах волн показало, что излучательная способность лесных пожаров возрастает с уменьшением длины волны и зависит от характера пожара. Приведенные на рис. 1 результаты усреднения зависимостей спектра радиоярких температур для различных элементов лесного пожара от длины волны позволяют достаточно надежно классифицировать эти элементы.

Синтез ГИМС для контроля пожароопасности лесов требует создания прикладных моделей, описывающих процессы пожарного созревания лесов. Основой для таких моделей, безусловно, является знание зависимости интенсивности радиотеплового излучения элемента лесного ландшафта от его влагосодержания. Наблюдения показывают, что с ростом пожарной зрелости слоев лесных горючих материалов изменяются статистические характеристики полей СВЧ-излучения лесных массивов.

В частности, такая зависимость может быть представлена в виде:

$$T_{я} = \kappa(\lambda, w) T_{\Pi} (1 - \exp\{-\alpha(\lambda, w)h\}) + T_{яП} \exp\{-\alpha(\lambda, w)h\},$$

где κ - и α - коэффициенты излучения и поглощения соответственно, w - влагосодержание среды, h - толщина излучающего слоя, T_{Π} - температура почвы, $T_{яП}$ - яркостная температура почвы. Якимовым [9] предложено следующее решающее

правило, основанное на расчете математического ожидания M^* и стандартного отклонения σ^* для записи $T_{\text{я}}$ участка лесной территории в диапазоне 2,25 см. Величина M^* сравнивается с пороговым значением $d=7,2514\sigma^*+249,876$: если $M^*\geq d$, то участок леса обладает средней или более высокой пожарной опасностью; если же $M^* < d$, то пожарная опасность на данном участке низкая. Дополнением подобной модели должна быть модель лесного пожара. Примером такой модели может служить модель, описывающая лесной пожар как бегущую волну, т.е. как самоподдерживающийся процесс локального высвобождения энергии в активной среде.

Перспективным в решении задач диагностики земных покровов является также миллиметровый диапазон (1-10 мм, 30-300 ГГц). Как показывают многочисленные экспериментальные исследования добавление в систему мониторинга каналов миллиметрового диапазона позволяет повысить точность классификации почвенно-растительных формаций с выделением шероховатостей и мелких образований. Особенно это важно в условиях антропогенного ландшафта.

Радиофизический мониторинг влажности почвы

Почвенная влага делится на прочносвязанную, рыхлосвязанную и свободную. Связанная влага - это вода, адсорбированная поверхностью частиц грунта и имеющая вид пленки толщиной до 6-8 молекулярных слоев. Объем связанной влаги в почвенном слое определяется типом грунта и колеблется в широком интервале от 2-3 % для песчаных почв до 30-40% для глинистых и лессовых почв. Связанная вода недоступна для растений и не влияет на солевой режим почвы. Поэтому система мониторинга должна осуществлять такое разделение влаги в почве.

Влажность почвы выражают в процентах от веса сухой почвы. Радиационные модели увлажнения почво-грунтов различных типов, учитывающие плотность грунта, его температуру и соленость, детально изучены. Наиболее информативными в этой задаче оказались длины волн 2,25 см, 18 см и 30 см. Модель СВЧ-излучения земного покрова в условиях неоднородно увлажненного поверхностного слоя основана на наличии вертикальной неоднородности коэффициента диэлектрической проницаемости (см. формулу (1)): $\epsilon \cong (1+0,5\rho_s)^2$. Величина ϵ является информативным индикатором изменения влажности почвы. С увеличением влажности почвы ϵ возрастает сначала медленно, если грунт был сухим, затем более быстро. Слабая зависимость ϵ на этапе начального увлажнения объясняется тем, что связанная влага характеризуется малой диэлектрической проницаемостью. Многообразие экспериментальных зависимостей ϵ от типов почв и размеров увлажнения представлено в работе [82]. Обладание такой базой знаний и привлечение ГИМС-технологии позволяет решать задачу диагностики влагосодержания W_s почвенного слоя. По существу задача сводится к восстановлению функции $W_s(z)$, для которой известны значения $W_{si}=W_s(z_i)$, измеренные дистанционно или on-site и если она удовлетворяет условиям:

$$\left. \frac{\partial W}{\partial z} \right|_{z=0} \leq C, \quad 0 \leq W_s(z) \leq K_s(z), \quad (5)$$

где $K_s(z)$ - заданная функция. При этом погрешности измерений имеют известный закон распределения.

Практика показала, что независимо от климатической зоны для приемлемой точности восстановления вертикального профиля влажности в метровом слое необходимо использовать СВЧ-радиометры 10 см и 30 см при измерении влажности W_{s1} поверхностного слоя почвы и иметь априорную информацию о ее водно-физических свойствах в виде средних значений влажности на горизонтах 50 см (W_{s2}) и 100 см (W_{s3}). Тогда принимается аппроксимация:

$$W_S^*(z) = az^3 + bz^2 + cz + d$$

неизвестные коэффициенты которой находятся традиционным способом из условия минимума функционала среднеквадратического отклонения:

$$\sum_{i=1}^3 [W_S(z_i) - W_S^*(z_i)]^2 = \min.$$

При этом необходимо выполнить ограничения (5).

Этот подход позволяет по данным СВЧ-радиометрических измерений, например, с борта самолета-лаборатории определять на больших площадях влагозапас почвы в метровом слое с погрешностью не более $0,03 \text{ г/см}^3$ при биомассе растительного покрова менее 2 кг/м^2 и с погрешностью до $0,07 \text{ г/см}^3$ при биомассе более 2 кг/м^2 .

Знание функции $W_S(z)$ позволяет использовать модель водного баланса территории для восстановления динамических характеристик почвы и других элементов водного баланса как функций геофизических и экологических параметров. Важным уточнением такой модели является экспериментальная оценка толщины верхнего слоя почвы, на нижней границе которого по оценкам Шутко [7,8] через 6 дней после дождя или полива происходит разрыв капиллярных связей. Характерная толщина этого пересушенного слоя колеблется в интервале 3 - 5 см.

Задача выбора оптимального диапазона электромагнитного излучения и синтеза на этой основе эффективной методики измерения содержания влаги в почве, безусловно, требует дополнительного исследования условий формирования полей излучения в системе *атмосфера-почва-растительность*.

СВЧ-радиометрия в диагностике температурных аномалий на земной поверхности

СВЧ-диапазон является информативной составляющей в многоканальных системах радиофизического мониторинга температурных аномалий, таких как упоминавшиеся выше лесные пожары, а также зоны загорания торфяных болот и штабелей торфа, областей геотермальной активности и др. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что на длинах волн 0,8 и 3,4 см радиояркостные контрасты в районах лесных пожаров и пожаров на торфяных болотах и торфяных разработках могут достигать величин $\Delta T_{я} \in [200, 300]^\circ\text{К}$. Самое важное обстоятельство здесь состоит в том, что СВЧ-диапазон оказывается чувствительным к изменению температуры поверхности, а следовательно обнаружение очагов возможного загорания может быть предупреждающим. В частности, при наблюдениях радиотеплового излучения торфа зафиксировано увеличение интенсивности излучения за счет нагрева от внутренних (глубинных) экзотермических реакций при отсутствии видимых признаков горения.

В общем случае при регистрации собственного излучения поверхности на волнах λ_1 и λ_2 имеем $\Delta T_{\text{я}} \approx \kappa \cdot \Delta z dT_{\text{П}}/dz$, где $\Delta z = z_2 - z_1$ - разность глубин подповерхностных излучающих слоев ($z_2 > z_1$), $dT_{\text{П}}/dz = -Q/k_T$, Q - интенсивность теплового потока, k_T - коэффициент теплопроводности слоя Δz . Чувствительность СВЧ радиометров составляет $dT_{\text{П}}/dz \approx 0,1-1$ градус/м. Это означает, что в сантиметровом диапазоне возможно дистанционное обнаружение зон утечек тепла на линиях теплотрасс и в зданиях.

Важной областью применения СВЧ-радиометрии является также дистанционный контроль за геотермальными источниками как при анализе их активности, так и при классификации геофизических структур в зоне их функционирования. В этом случае из-за того, что влажность пород, как правило, незначительна, глубина проникновения электромагнитной волны в грунт увеличивается и равняется обратной величине коэффициента поглощения на единицу глубины z .

В связи с проблемой изменения климата в глобальной экоинформатике особую роль приобретает мониторинг лесных пожаров. Состояние леса и его влияние на концентрацию парниковых газов важно для достоверной оценки тенденций в изменении окружающей среды. Поэтому глобальная геоинформационная мониторинговая система должна обладать функцией такой оценки. Реальное воплощение такой функции зависит от развития удовлетворительной модели, связывающей состояние лесного массива и его собственное радиотепловое излучение. Создание модели требует изучения характеристик зависимости радиотеплового излучения леса на различных длинах волн от увлажненности лесных горючих материалов, располагающихся слоями. Исследования многих авторов показали, что имеется реальная возможность оценивать пожарную опасность заболоченных и болотных лесов с учетом реального влагосодержания растительного покрова и верхнего слоя почвы, применяя микроволновое зондирование в диапазоне 0,8 - 30 см. Многоканальное зондирование позволяет с помощью алгоритмов кластерного анализа решать задачу классификации лесного массива по категориям пожарной зрелости.

Эффективность СВЧ-методов применительно к диагностике лесных пожаров также зависит от детальности описания в модели структуры лесного массива, отражающей состояние кроны и плотность деревьев. Наиболее опасными и трудно обнаруживаемыми являются низовые пожары. В этом случае эффективной является трехслойная модель системы *пламя/дым/крона деревьев*:

$$\alpha_p = (1 - \exp\{-\kappa_1\}) \exp(-\kappa_2) \exp(-\kappa_3),$$

где α_p - излучательная способность очага низового лесного пожара, κ_i - коэффициент ослабления излучения пламенем ($i=1$), дымом ($i=2$) и всей толщине кроны деревьев ($i=3$).

Коэффициенты ослабления излучения в кроне леса являются функциями типа деревьев. Установлено, что поглощение в кроне сильно растет с уменьшением длины волны. При этом для древостоя большой сомкнутости прием излучения и обнаружение очагов низового лесного пожара представляется затруднительным. Тем не менее, на длинах волн 0,8- 1,5 см мониторинг лесного пожара оказывается реализуемым в большинстве случаев. Это связано с тем, что основной вклад в СВЧ-излучение очага пожара вносят частицы пламени размером до 100-300 мкм. В очаге пожара на длине волны 0,8 см приращение радиояркостной температуры составляет около 200К, что значительно превышает порог чувствительности ра-

диометров. Поэтому микроволновый мониторинг лесного пожара в отличие от оптических методов не зависит от погодных условий.

Существующие системы мониторинга лесных пожаров детально охарактеризованы в работе [17], где оценена их информативность для территории России. В основе этой системы лежат данные, получаемые с помощью AVHRR и TOVS, размещенных на серии спутников NOAA с полярными орбитами. В более широком аспекте проблема мониторинга состояния лесных экосистем рассматривается в проекте GOFС, главная цель которого состоит в том, чтобы предоставить основу для международного обмена информацией, координации сбора данных наблюдений и обеспечить основу для создания необходимых систем долгосрочного мониторинга. Картографирование и мониторинг пожаров GOFС направлены на улучшение и определение международных требований к наблюдениям, и наилучшее использование данных о пожарах, получаемых с существующих и будущих спутниковых систем, для борьбы с пожарами, проведения политики по их управлению и исследований по глобальным изменениям.

Модель слоистой среды для микроволновой технологии мониторинга земных покровов

Решение большинства прикладных задач агрометеорологии, лесоводства, животноводства и многих сфер природоохранной деятельности человека затруднено по причине отсутствия эффективных средств оперативного контроля за состоянием системы «почва-растительность». Развитие к настоящему времени аэрокосмические технологии, обладающие кажущимися на первый взгляд эффективными возможностями такого контроля, при попытках практического использования оказываются часто бесполезными или, в лучшем случае, позволяют получать информации, использование которой невозможно из-за отсутствия алгоритмов ее целенаправленной обработки. Другими словами, имеет место несбалансированное развитие основных элементов аэрокосмического мониторинга земных покровов, как основного средства оперативного и масштабного сбора и интерпретации данных о системе «почва-растительность». Здесь технические средства существенно опережают средства обработки данных мониторинга. Причина такого отставания вторых связана со сложностью и многообразием теоретических задач, требующих построения параметрических описаний процессов излучения, рассеивания, отражения и поглощения электромагнитных волн различных диапазонов от ближней ультрафиолетовой области (0,3-0,4 мкм) до микроволновой области спектра (1мм-1,3 м). Наиболее сложными оказываются задачи интерпретации (обратные задачи) данных регистрации электромагнитных волн.

Исследования в области аэрокосмического мониторинга окружающей среды, направленные на решение указанных выше задач, привели к достаточно заметному разграничению развитых технологий, алгоритмов и моделей на две области электромагнитного спектра: видимый и сверхвысокочастотный (СВЧ). Последний разделился на миллиметровый, сантиметровой и дециметровый. В каждом из этих поддиапазонов существуют специфические подходы, как к решению обратных задач, так и к синтезу технических систем.

Исследования многих авторов обеспечили конструктивную технологию микроволнового мониторинга наземных природных и антропогенных систем. Как показали многочисленные экспериментальные применения СВЧ-радиометрии для изучения почв и растительных покровов развитые технологии требуют уточнения с целью повышения их эффективности и, особенно, классификационных функ-

ций. Это возможно за счет подключения моделей функционирования почвенно-растительных формаций, обеспечивающих восстановление корреляций между их элементами и, в частности, позволяющих рассчитывать параметры вегетации и влагооборота, что, безусловно, должно повысить точность уже имеющихся параметризаций СВЧ-радиометрии. В данной работе предлагается методика расчета характеристик СВЧ излучения системы «почва-растительность» с учетом экранирующего влияния растительного покрова при динамике его развития во времени.

В общем случае, представим систему *почва-растительность* как трехслойную среду *почва-стволы-крона*, СВЧ-излучение которой формируется совокупностью процессов поглощения и рассеяния внутри сред и отражения на их границах. Наиболее тщательное изучение моделей возможных здесь конфигураций структур взаимного влияния сред требует привлечения сложных моделей, которые предъявляют большие требования к базе данных. В первом приближении излучательная способность слоистой среды *почва-стволы-крона* можно описать моделью:

$$\kappa = 1 - |\dot{r}|^2, \quad (6)$$

$$\dot{r} = \frac{\dot{r}_{12} \exp(-2i\psi d) + \dot{r}_{23}}{\dot{r}_{12}\dot{r}_{23} + \exp(-2i\psi d)} \quad (7)$$

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} [\dot{\epsilon}_2 - \sin^2 \theta]^{1/2} = \psi' - i\psi'', \quad (8)$$

где θ - угол между направлением распространения электромагнитной волны в атмосфере и границей раздела *атмосфера-крона*, \dot{r}_{12} и \dot{r}_{23} - комплексные коэффициенты отражения (коэффициенты Френеля) от границ раздела «атмосфера-крона» и «крона-почва», d - высота растительного покрова.

Коэффициенты Френеля определим в виде:

$$\dot{r}_{ik} = |\dot{r}_{ik}| \exp[-i\phi_{ik}] \quad (9)$$

где ϕ_{ik} - фазовый сдвиг.

Из (6)-(9) получаем:

$$\kappa = \frac{(1 - r_{21}^2)(1 - r_{32}^2 \exp[-4\psi'' d]) - 4r_{21}r_{32} \exp[-2\psi'' d] \sin \phi_{21} \sin(\phi_{32} + 2\psi' d)}{1 + r_{21}^2 r_{32}^2 \exp[-4\psi'' d] + 2r_{21}r_{32} \exp[-2\psi'' d] \cos(\phi_{21} + \phi_{32} + 2\psi' d)} \quad (10)$$

где обозначено $r_{ik} = |\dot{r}_{ik}|$.

Расчет коэффициентов Френеля и фазовых углов выполняется по формулам:

$$r_{ik} = \left\{ \frac{(\gamma_i - \gamma_k)^2 + (\delta_i - \delta_k)^2}{(\gamma_i + \gamma_k)^2 + (\delta_i + \delta_k)^2} \right\}^{1/2}, \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \phi_{ik} = \frac{2(\delta_i \gamma_k - \delta_k \gamma_i)}{\gamma_i^2 - \gamma_k^2 + \delta_i^2 - \delta_k^2} \quad (i, k = 1, 2, 3), \quad (12)$$

$$\gamma_k = \begin{cases} \alpha_k / a_k & \text{горизонтальная поляризация,} \\ \frac{\alpha_k \varepsilon'_k + \beta_k \varepsilon''_k}{(\varepsilon'_k)^2 + (\varepsilon''_k)^2} & \text{вертикальная поляризация,} \end{cases} \quad (13)$$

$$\delta_k = \begin{cases} \beta_k / a_k & \text{горизонтальная поляризация,} \\ \frac{\alpha_k \varepsilon''_k - \beta_k \varepsilon'_k}{(\varepsilon'_k)^2 + (\varepsilon''_k)^2} & \text{вертикальная поляризация,} \end{cases} \quad (14)$$

$$\alpha_k = \{0,5(a_k + b_k)\}^{1/2}, \quad \beta_k = \{0,5(a_k - b_k)\}^{1/2}, \quad a_k = [b_k^2 + (\varepsilon''_k)^2]^{1/2},$$

$$b_k = [(\varepsilon'_k)^2 - \sin^2 \theta]^{1/2}, \quad (k = 1, 2, 3);$$

$\dot{\varepsilon}_2 = \varepsilon'_2 - i\varepsilon''_2$ - диэлектрическая проницаемость растительного покрова, $\dot{\varepsilon}_3 = \varepsilon'_3 - i\varepsilon''_3$ - диэлектрическая проницаемость почвы, $\dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon'_1 - i\varepsilon''_1$ - диэлектрическая проницаемость воздуха ($\varepsilon'_1 = 1, \varepsilon''_1 = 0$).

Определим коэффициенты Френеля через характеристики растительного покрова (плотность, биомасса, высота, влагосодержание). Входными параметрами в (13) и (14) являются диэлектрические проницаемости растительности и почвы. В общем случае растительная биомасса и почва могут рассматриваться как двухкомпонентные смеси из сухого вещества и воды. В этом случае достаточно точной является формула Брауна для представления диэлектрической проницаемости смеси "вода-сухая почва":

$$\sqrt{\dot{\varepsilon}_3} = \rho_B \sqrt{\varepsilon_B} + (1 - \rho_B) \sqrt{\varepsilon_C},$$

где ρ_B - относительная объемная концентрация воды, ε_C - и ε_B - диэлектрическая проницаемость сухой почвы и воды соответственно. Величина ε_C хорошо аппроксимируется формулой:

$$\sqrt{\varepsilon_C} \approx 1 + 0,5\rho_C,$$

где ρ_C - плотность сухого грунта ($\text{г} / \text{см}^3$).

В работе [11] дана графическая зависимость ε'_3 и ε''_3 от объемного содержания влаги h в почве, в составе которой 30,6% песка, 55,9% ила и 13,5% глины. Видно, что $\varepsilon_B = 0$ и $\varepsilon'_3 > \varepsilon_3$. Величины ε'_3 и ε''_3 как функции длины волны λ в этом случае являются возрастающими и приближенно аппроксимируются выражениями:

$$\varepsilon'_3 = 2,35 + [52,4h + 31,1h^2] \exp\{0,057 - 1,22 / \lambda\} \quad (15)$$

$$\varepsilon''_3 = [7,1h + 46,9h^2] \exp\{0,0097 - 1,84 / \lambda\} \quad (16)$$

Таким образом, с учетом зависимостей (15) и (16) или аналогично построенных аппроксимаций для других типов почв создается возможность решения задачи оптимизации выбора микроволнового диапазона, что может значительно упростить процедуру дистанционного мониторинга и повысить оперативность оценки содержания влаги в почве и понять роль растительного покрова в экранировании микроволнового излучения почвы. Конечно, здесь имеется ряд еще нерешенных задач, связанных с внесением поправок в изложенную модель за счет учета шероховатости поверхности почвы и влияния помех на формирование уровня регистрируемой радиояростной температуры T_J , а также множество особенностей решения обратных задач микроволновой радиометрии. Основой дальнейших уточнений модели может служить соотношение между T_J , показателем $\iota(H)$ влияния атмосферы на принимаемый на высоте H радиометром сигнал, отражательной способностью χ гладкой поверхности, термодинамическими температурами почвы (T_s) и атмосферы (T_a):

$$T_J = \iota(H)[\chi T_{sky} + (1-\chi)T_s] + T_a \quad (17)$$

где T_{sky} – вклад в T_J за счет отраженной яркости неба.

Вводя показатель шероховатости поверхности почвы g как среднюю вариацию уровня почвы по отношению к гладкой поверхности отражательная способность в (5.23) может быть пересчитана по формуле:

$$\chi' = \chi \exp(-g \cos^2 \theta),$$

где θ - угол падения излучения.

Наконец, приведем предложенное в работе [11] соотношение между влагосодержанием почвы h и растительности W :

$$H = 78,9 - 78,4[1 + (e-1)\exp\{0,22W\}],$$

где $e = (1-\chi)$.

Следовательно, исследования в области микроволновой радиометрии должны вестись в двух направлениях: эмпирическое изучение зависимостей яркостных температур от факторов окружающей среды и построение аналитических параметризаций этих зависимостей. В результате должна быть создана база знаний микроволновой радиометрии, совместное использование которой с алгоритмами распознавания образов позволит синтезировать высокоэффективную систему классификации объектов окружающей среды лишь на основе эпизодических измерений отраженного излучения в микроволновом диапазоне волн.

Здесь следует отметить, что успешное развитие микроволновых технологий диагностики земных покровов, особенно лесных территорий, невозможно без сочетания с уже хорошо развитыми технологиями мониторинга с применением сенсоров видимого и инфракрасного диапазонов волн. В самом деле, дополнительно к сказанному в главе 2 добавим, что именно в оптическом диапазоне созданы приемы оценки различных характеристик лесного полога. В частности, на

основе измерения спектральных яркостей полого леса можно рассчитать показатель структуры полого (CSI):

$$CSI=[2-S_R(S_R-W_I)+S_R+W_I],$$

где $S_R=(SR_{680}-1)/(SR_{680}-1)_{\max}$, $W_I=(WI_{1180}-1)/(WI_{1180}-1)_{\max}$, $WI_{1180}=R_{900}/R_{1180}$, $SR_{680}=R_{800}/R_{680}$, R_λ - спектральная яркость на длине волны λ (680, 800, 900, 1180 нм).

Микроволновая радиометрия растительных пологов в контексте исследования глобального изменения

В течение последних десятилетий глобальный круговорот углерода интенсивно изучался многочисленными исследователями, которые связывают будущее изменение климата с увеличением концентрации углекислого газа (CO_2) и других парниковых газов в атмосфере [3,14,15]. Действительно, в 2001 г. Межправительственное соглашение по климату заключило, что наибольшее потепление в первой половине 20-го столетия было связано с деятельностью человека, а именно с возрастанием концентрации парниковых газов в атмосфере. Также было высказано предупреждение о том, что такие изменения продолжатся в последующие столетия. Наиболее главным среди всех парниковых газов безусловно является CO_2 , атмосферная концентрация которого драматически нарастает по причине вмешательства человека в глобальный круговорот углерода. Данные докладов межправительственной группы экспертов по изменению климата [10,18] позволяют рассмотреть динамику глобального круговорота углерода и изменения климата в последнем столетии [2]:

- Концентрация углекислого газа в атмосфере, составлявшая в доиндустриальную эпоху 280 ± 10 млн⁻¹ на протяжении нескольких тысяч лет, за прошедшее столетие непрерывно возрастала и к 2008 г. достигла 369 млн⁻¹.

- Главной причиной роста концентрации CO_2 является сжигание ископаемых топлив. Связанные с этим (а также, в небольшой степени, - с функционированием цементной промышленности) глобальные выбросы CO_2 в атмосферу в период 1980-1989 гг. составляли $5,4\pm 0,3$ ПгС(петаграмм)/год, в 1990-1999 гг. достигли $6,3\pm 0,4$ ПгС/год, а в 2007 г. оценивались величиной $6,9\pm 0,4$ ПгС/год.

- Ежегодное увеличение общего содержания CO_2 в атмосфере было равно $3,3\pm 0,1$ ПгС/год в 1980-1989 гг. и слегка уменьшилось до $3,2\pm 0,1$ ПгС/год в 1990-1999 гг., снизившись до $3,15\pm 0,1$ ПгС/год в 2007 г. Разность между ежегодным уровнем выбросов CO_2 и его содержанием в атмосфере характеризует масштабы усвоения CO_2 Мировым океаном и экосистемами суши.

В период 1991-1997 гг. за счёт сжигания ископаемых топлив в атмосферу поступали примерно 6,2 ПгС/год в форме углекислого газа. За это время содержание CO_2 в атмосфере возрастало только на 2,8 ПгС/год. Используя данные наблюдений концентрации O_2 в атмосфере, было установлено, что в течение упомянутого периода биосфера суши и Мировой океан усваивали, соответственно, $1,4\pm 0,8$ и $2,0\pm 0,6$ ПгС/год. Быстрое запасание биосферой суши углерода в этот период контрастирует с условиями 1980-х гг., когда она была практически нейтральной. Что касается Мирового океана, то он был мощным стоком углерода до 1995 г., но в 1995-1996 гг. произошёл спад усвоения углерода. По-видимому, запасание углерода на суше более изменчиво, чем в океанах.

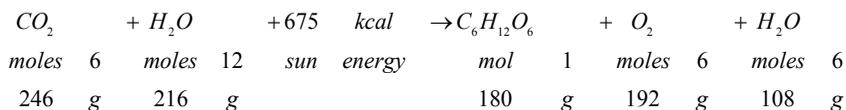
Термин "парниковое" воздействие означает сумму результатов моделирования эффектов, вызываемых в климатической системе и связанных с некоторым чис-

лом природных и антропогенных процессов [124]. В общем, этот термин относится к объяснению изменений в тепловом режиме атмосферы, связанном с воздействием некоторых газов на процесс переноса радиации. Многие газы характеризуются высокой стабильностью и длительным временем пребывания в атмосфере, к которым CO_2 и относится.

Чтобы оценить уровень парникового воздействия CO_2 необходимо предсказать его концентрацию с учетом всех имеющихся обратных связей в глобальном биогеохимическом цикле углерода, а также его корреляции с циклами других парниковых газов. Согласно имеющимся оценкам вклад углекислого газа в парниковый эффект составляет 63.5%. Известно, что роль Мирового океана в круговороте CO_2 превосходит роль других его резервуаров. Тем не менее, круговорот CO_2 в системе *атмосфера-растение-почва* также важен. Этот круговорот был в деталях описан в монографиях Кондратьева и Крапивина [3] и Тарко [6], где основные потоки углерода были представлены. Фотосинтезирующие элементы этих экосистем поглощают CO_2 из атмосферы и переводят его в биомассу и гумус. Поэтому интенсивность потока углерода в биоценозе зависит от его биомассы и продуктивности. Ясно, что точность оценки продуктивности наземной экосистемы, а также надежность и детальность его структурной классификации очень важны для спецификации глобальной схемы потоков углерода. Поэтому, анализируя поток углерода в биосфере важно принять во внимание наибольшее количество его резервуаров и потоков, а также их пространственное распределение [12]. Это приводит к большому числу глобальных моделей углеродного цикла. Современный уровень развития этих моделей не позволяет однозначно ответить на вопрос о необходимом уровне развития глобальных баз данных о запасах и потоках углерода. Поэтому многие авторы, анализируя динамику характеристик глобального цикла углерода, используют лишь фрагменты баз данных о стоках источниках углерода.

Взаимодействие между двумя резервуарами углерода - атмосферой и сушией - выражается наличием потоков углерода, формируемых экологическими, геофизическими и геохимическими процессами. Сюда относятся фотосинтез, респирация растений и животных, разложение мертвого органического вещества, сжигание растительности и топлива, вулканические эманации, выветривание горных пород и т.п. Какой из этих процессов может оказаться преобладающим зависит от многих факторов. Поэтому в схеме рассматриваемого здесь парникового эффекта они учтены все.

Наиболее важным моментом в изучении глобального цикла углерода является поиск зависимости между наземной растительностью и атмосферой в плане обмена CO_2 . Основой этой зависимости является то, что все растения создают свою биомассу за счет усвоения атмосферных, среди которых главными являются углерод, кислород, азот и сера. Ясно, что при детальном анализе процесса фотосинтеза необходимо также учитывать кинетику CO_2 , CH_4 , H_2O , H_2S , NH_3 и NO_2 . Минимальным требованием при обеспечении ассимиляции CO_2 является наличие CO_2 , H_2O , света, хлорофилла и подходящих условий окружающей среды (температуры и влажности). Поэтому простейшая ассимиляционная формула может быть записана в следующем виде:



Эта формула применима для расчета баланса между растениями и атмосферой только по обмену углекислым газом, но не применима для воды, так как вода является лимитирующим фактором для фотосинтеза, и растения за счет неучтенной в формуле транспирации используют значительно больше воды. В моделях глобального уровня детализация процесса ассимиляции углерода должна вестись осторожно из-за опасности нарушения равновесного описания других процессов. Обычно это реализуется введением необходимых поправок. Например, учитываются возможные потери в балансовом соотношении фотосинтеза. По умолчанию эти потери составляют 20-30 %, т.е. в среднем из 6 молей CO_2 получается 0,75 молей глюкозы.

Также необходимо учитывать пространственную неоднородность земных покровов, отличающихся по плотности биомассы и интенсивности образования органического вещества. Действительно, в среднем 90% общей биомассы (≈ 830 ГтС) занимают лесные массивы (≈ 50 млн. м^2), из них 50% составляют тропические леса ($\approx 24,5$ млн. км^2) и только 10% (≈ 84 ГтС) относится к кустарникам, саваннам, лугам, пустыням, полупустыням, болотам и культивируемым землям. При этом процесс образования органического вещества характеризуется высокой неоднородностью: лесные массивы - 33 ГтС/год, вся остальная растительность - 20 ГтС/год. Эти неоднородности приводят к мозаичной картине солнечной энергетики и поэтому должны учитываться при синтезе модели.

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 с учетом указанной выше бинарной дискретизации типов растений на два класса.

Обозначим через $R_k(\varphi, \lambda, t)$ продукцию фотосинтеза для растительности типа k на широте φ и долготе λ в момент времени t . Тогда поток CO_2 из атмосферы в живую биомассу можно описать простой моделью:

$$H_6^C(\varphi, \lambda, t) = C_{23} R_k(\varphi, \lambda, t),$$

где коэффициент C_{23} отражает эффективность механизма реакции фотосинтеза и в среднем оценивается величиной $C_{23} \approx 0,549$. Поглощение CO_2 растительностью можно рассчитать по формуле:

$$H_6^C = k_b \left(1 + \beta \ln \left[\frac{C_A}{C_A^*} \right] \right) C_k,$$

где параметр $\beta \in [0, 1]$ является мерой способности растительной системы откликаться на увеличение парциального давления атмосферного CO_2 , C_k - содержание углерода в биомассе k -го типа растительности, k_b - коэффициент пропорциональности, зависящий от температуры и типа растительности; C_A - концентрация углекислого газа в атмосфере в доиндустриальный период.

Разные авторы дают оценку потока $H_6^C(\varphi, \lambda, t)$ в пределах от 16.7 до 35 ГтС/год. Такой разброс этих оценок, тем не менее, позволяет оценить коэффициенты в аппроксимациях H_6^C . Более точное описание H_6^C требует построения дополнительного блока модели, учитывающего взаимозависимость между $[\text{CO}_2]$ и функционированием наземных биомов данной территории. Для описания

функции R_k дополнительно используются эмпирические зависимости. В базу данных моделирующей системы заносится информация, подобная этой, а также сведения о параметрах почвенно-растительных формаций. Конечно, мировые данные о балансе CO_2 в биосфере достаточно противоречивы и формируются с опозданием и с усреднением за большие промежутки времени.

Из приведенного выше обсуждения следует, что продукция фотосинтеза следовательно и сток углерода из атмосферы строго зависят от температуры воздуха и режима влажности (влажность почвы может служить характеристикой этого режима). Но именно температура воздуха и влажность почвы являются теми параметрами, которые хорошо измеряются в микроволновом диапазоне. Более того, два основных потока CO_2 из растений в атмосферу, т.е. поток дыхания и поток от разложения гумуса также зависят от температуры и влажности.

Более точные модели роста растительности и продуктивности стартуют от уравнения энергобаланса, которое описывает обмен энергией на границе атмосферы и растительного покрова. Например, в модели биосферы SiB2 имеются уравнения для определения температуры, влажности и испарения для полога растений и трех слоев почвы. Помимо этого модели радиационного переноса (*почва-лиственный полог-атмосфера*) и фотосинтеза были созданы. Модель фотосинтеза растительного полога рассматривает один слой растительности, поверхность почвы и корни, а также зону подпитки. Уравнения модели SiB2 основаны на понятии потокового обмена в системе *растительный полог-почва-атмосфера*. Эта модель чувствительна к переносу тепла за счет испарения влаги с растительного полога и поверхности почвы, а также к потоку CO_2 . Модель ALiBi является двухслойной моделью: балансы энергии вычисляются на поверхности почвы и для полога растительности, что позволяет разделить имитацию испарения с почвы и транспирацию растений.

Пример глобальной модели круговорота углерода для земной поверхности дан в работе [3]. На i -м участке суши площадью S_i почвенно-растительная формация характеризуется количеством углерода на единице площади в биомассе живых растений B_i и в мертвом органическом веществе почвы D_i :

$$\partial B_i / \partial t = F(T_i, P_i) \left[1 + (\delta / 10) (C_a / C_a^0) \right] - K_i B_i,$$

$$\partial D_i / \partial t = K_i B_i - E(T_i, P_i) D_i,$$

$$\partial C_a / \partial t = \sum_{i=1}^N \left\{ \left[F(T_i, P_i) (1 + (\delta / 10) (C_a / C_a^0 - 1)) - E(T_i, P_i) D_i \right] S_i \right\} + V,$$

где $F(T_i, P_i)$ – годовая продукция растений на единице площади, $E(T_i, P_i)$ – удельная скорость разложения мертвого органического вещества почвы на единице площади, T_i и P_i – среднегодовая температура атмосферы и количество осадков за год над i -м участком суши соответственно, δ – показатель увеличения годичной продукции в процентах при возрастании содержания CO_2 в атмосфере на 10%, K_i – удельная интенсивность отмирания биомассы растений на i -м участке суши, $C_a^0 = C_a(t_0)$, t_0 – начальный момент времени (в глобальных моделях обычно принимается $t_0=1850$ г.), V – антропогенное поступление углерода в атмосферу.

Предположим, что при отсутствии антропогенных воздействий ($V=0$) количество углерода в системе АРП постоянно и в начале индустриального периода система находилась в положении равновесия. Тогда в момент t_0 справедливы соотношения:

$$K_i = B_i^0 / F(T_i^0, P_i^0); \quad E(T_i^0, P_i^0) = F(T_i^0, P_i^0) / D_i^0(T_i^0, P_i^0); \quad (i = \overline{1, N})$$

В результате модель позволяет рассчитывать динамику углерода в трех резервуарах с учетом их пространственного распределения. В зависимости от детализации типов растительных покровов расчет концентрации углерода в растительном покрове, почве и атмосфере требует знания функций F и E , а также коэффициента δ . Мы можем видеть, что параметры модели существенно зависят от поверхностной температуры и влажности почвы. Более того, биомасса растений (или ее увеличение) можно получить из радиометрических измерений и, в принципе, эти данные можно использовать как калибровочные параметры.

Изучение переноса энергии и массы в почвах и пологе растений является важным для понимания усвоения CO_2 и его выделения в системе растительность-почва. Несколько полуэмпирических моделей были развиты для связывания дистанционных данных, полученных в видимом и инфракрасном диапазонах волн, чтобы оценить эвапотранспирацию и фотосинтез. Оценка эвапотранспирации и фотосинтеза может быть получена с использованием моделей переноса в системе АРП (SVAT-модели). В этих моделях уравнение энергетического баланса для покрытой растительностью почвы обычно записывается в форме:

$$R_n = H + LE + G,$$

где R_n - радиация, H есть поток ощутимого тепла, LE - поток латентного тепла, и G - тепловой поток из земли. Доля чистой радиации, которая достигает поверхности и используется в фотосинтезе обычно опускается в правой части уравнения (5.8), так как она вносит незначительную долю в R_n . Система *растение-почва* может быть разделена на несколько слоев, а модель (5.41) записывается для каждого из них. Достоинство SVAT-моделей состоит в том, что они дают оценку для детального описания почвы и растительного покрова и позволяют имитировать гидрологические и физиологические процессы в их взаимосвязи. Таким образом, они позволяют оценить влажность почвы по дистанционным данным, а затем использовать в других моделях, таких как модели атмосферы или гидрологических процессов. Другое достижение, связанное с эмпирическим подходом, состоит в том, что они могут функционировать без регулярного поступления дистанционных данных, обеспечивая интерполяцию модельных данных между моментами поступления дистанционных измерений.

Необходимо отметить, что модель MICRO-SWEAT связывает имитацию переноса тепла, воды и микроволнового излучения в системе АРП и может быть использована для предсказания соотношения между содержанием воды в поверхностном слое и яркостной температурой в микроволновом спектре. Несмотря на ограниченное количество исследований, ассимиляция микроволновых данных в модели типа SVAT показала свою эффективность как инструмент для оценки эвапотранспирации и фотосинтеза растительного полога, и, следовательно, для оценки потоков углерода между растительностью и атмосферой. Знание состояния почвенно-растительной формации позволяет нам иметь реальную картину пространственного распределения стоков углерода и его источников на поверхности Земли.

Литература

1. Арманд Н.А., Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А. Методы обработки данных радиофизического мониторинга исследования окружающей среды. М.: Наука, 1987, 270 с.
2. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Лакаса Х. и др. Глобализация и устойчивое развитие: Экологические аспекты. Введение. Санкт-Петербург: Наука, 2006. - 241 с.
3. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. М.: Физматлит, 2004. - 336 с.
4. Крапивин В.Ф., Потапов И.И., Солдатов В.Ю. Методы глобальной экоинформатики. Изд-во Твори, Винница, Украина, 2019. 383 с.
5. Савин А.И., Бондур В.Г. Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем. Оптика атмосферы и океана. – 2000. - № 1. - С. 46-63.
6. Тарко А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. М.: Физматлит, 2005. - 232 с.
7. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. - 189 с.
8. Шутко А.М., Крапивин В.Ф. Оперативная диагностика, оценка масштабов и уменьшение последствий стрессовых природных процессов. София: Академическое издательство им. Проф. Марина Дринова. - 2011.- 287 с. Рецензия: Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2015, №6, с. 160-162.
9. Якимов С.П. Алгоритмы оценки пожарной опасности леса по данным дистанционного зондирования. Кандидатская диссертация. Красноярск: Красноярский Гос. Технич. Ун-т, 1996. - 155 с.
10. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Paris: The 10th Session of Working Group 1 of the IPCC, 2007. - 18 pp.
11. Engman E.T., Chauhan N. Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing. Remote Sensing of Environment. - 1995. - Vol. 51, No.1.- Pp. 189-198.
12. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Nitu C. An application of global simulation model to the study of CO₂ greenhouse effect. Proceedings of International Conference "World Energy Systems", 15-17 May 2004, University Oradea, Romania. - Pp. 467-472.
14. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Global Carbon Cycle and Climate Change. Chichester, U.K.: Springer/PRAXIS, 2003. - 343 pp.
15. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Natural Disasters as Interactive Components of Global Ecodynamics. Chichester: Springer/Praxis, UK, 2006. - 578 pp.
16. Krapivin V.F., Nitu C., Varotsos C.A. (2019) Remote sensing tools and ecoinformatics. Matrix Rom, Bucharest, Romania, 332 pp.
17. Loupian E., Mazurov A., Flitman E. et al. Satellite monitoring of forest fires in Russia at Federal and regional levels. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. – 2006. - Vol. 11, No. 1. - Pp. 113-145.
18. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. London: Final Draft. IPCC, 2005. - 571 pp.