

ОХРАНА ПОЧВ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-09-4

УДК 502. 52

ДИСТАНЦИОННОЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОЧВЫ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ В КОНТЕКСТЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Д-р физ-мат. наук **А.А. Чухланцев**,
д-р физ-мат. наук **В.Ф. Крапивин**

(Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
chukhantsev@ms.ire.rssi.ru)

MICROWAVE RADIOMETRY OF SOIL AND VEGETATION IN THE CONTEXT OF GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE

A.A. Chukhlantsev, V.F. Krapivin

Ключевые слова: дистанционное зондирование, модель, углерод, океан, мониторинг, почва, растительность.

Keywords: remote sensing, model, carbon, monitoring, soil, vegetation.

В работе проведен анализ состояния исследований в области дистанционного СВЧ радиометрического зондирования почвы и растительности и намечены некоторые перспективы дальнейших исследований в данном направлении. Обобщены результаты теоретических и экспериментальных работ по разработке и верификации моделей СВЧ излучения земной поверхности при наличии растительного покрова. Рассмотрены связь параметров моделей с характеристиками почвы и растительности и определение этих характеристик по данным СВЧ радиометрического зондирования.

Обсуждаются современные достижения в области изучения глобального круговорота углерода с применением методов математического моделирования. Анализируются подходы к синтезу моделей глобального круговорота углерода. Рассматриваются проблемы изменения глобального климата в связи с ростом концентрации углекислого газа в атмосфере и оцениваются вклады наземной биоты и Мирового океана в эти изменения. Предлагается новая концепция глобальных изменений окружающей среды, основанная на интеграции знаний в рамках системы адаптивного геоинформационного мониторинга, в которой микроволновая радиометрия обеспечивает оценку входных характеристик моделей почвенно-растительных формаций с высокой точностью.

The state of research in the field of microwave radiometry of soil and vegetation is analyzed in the report. Directions of future prospective research in this field are discussed. Results of theoretical and experimental studies on the development and verification of models for microwave emission of the Earth's surface in the presence of vegetation canopies are generalized. The relation of model parameters to features of soil and vegetation and the retrieval of these features from microwave radiometric measurements are considered.

Recent achievements in the area of global carbon cycle studying with the use of mathematical modeling methods are discussed. Approaches to the synthesis of global carbon dioxide cycle modeling results are analyzed. The problems of global climate change are considered in connection with the growth of atmospheric concentration of carbon dioxide, and the role of land biota and World Ocean in these changes is evaluated. A new concept for the study of global environmental change is proposed. It is based on the integration of knowledge about the system of adaptive geoinformation monitoring. In this system, the microwave radiometry provides the evaluation of input characteristics for soil-plant formations models with high precision.

Введение

Проблема глобальных изменений климата в последние годы обсуждается в научной литературе в связи с возрастающей концентрацией парниковых газов в атмосфере [1-41]. Отмечается важная роль микроволновой радиометрии в изучении этих изменений. Исследование СВЧ излучения системы почва – растительность, а также возможностей определения параметров почвы и растительности по данным дистанционного СВЧ радиометрического зондирования с борта самолетов и спутников активно ведется на протяжении последних тридцати лет многочисленными научными группами и организациями различных стран. Библиография работ по указанной проблеме насчитывает сотни наименований. Возможности применения СВЧ радиометрического метода для определения влажности почвы и биометрических показателей растительности выявлены в работах многих авторов около четверти века назад [4,5,7,34,22]. Несмотря на то, что принципиальные вопросы и физические основы СВЧ радиометрии почвенно-растительных покровов в целом достаточно полно изучены, интерес к проведению исследований в данной области не только не ослаб, но и существенно вырос в последнее десятилетие. Данный факт объясняется, во-первых, важностью самого объекта исследований в общей системе дистанционного экологического мониторинга поверхности суши и, во-вторых, возросшими техническими возможностями СВЧ радиометрических средств дистанционного зондирования с космических носителей. Действительно, влажность почвы и растительный покров играют ключевую роль в гидрологическом цикле, в процессах переноса влаги и энергии на границе поверхности суши и атмосферы вследствие испарения, инфильтрации и транспирации. В связи с дискуссией в научной литературе о достоверности имеющихся многочисленных оценок парникового эффекта по причине антропогенных выбросов CO₂ знание динамических характеристик почвенно-растительных формаций становится также актуальным.

Применение СВЧ радиометрических средств с космических носителей требует разработки систем с высоким пространственным разрешением для получения радио изображений земной поверхности. В современных и проектируемых космических системах это достигается с помощью многолучевых антенн, электрического сканирования с использованием больших антенн, синтезирования апертуры. Крупные международные проекты, включающие глобальный мониторинг влажности почвы и гидрологического состояния поверхности суши, как осуществленные («Природа» [16], EOS Aqua [31]), так и планируемые (SMOS [37]), показывают, что вопрос о применении СВЧ радиометрических методов дистанционного зондирования системы *почва – растительность* все больше переходит из

области теоретических изысканий в плоскость практического применения. В связи с этим представляется полезным проанализировать состояние исследований в данной области.

Данная работа обобщает теоретические и экспериментальные исследования в области СВЧ радиометрии почвы и растительности, выполненных в ИРЭ РАН. Рассматриваются также результаты работ в данном направлении, полученные другими исследовательскими группами. Намечены направления перспективных направлений исследования по указанной проблеме. Предлагается алгоритм уточнения климатического отклика на выбросы CO₂ в атмосферу.

СВЧ излучение земной поверхности при наличии растительного покрова

Радиояркая температура T_b является мерой *интенсивности* излучения испускаемого земной поверхностью. Поэтому при моделировании излучения растительных покровов обычно применяется теория переноса излучения. Численное решение данного уравнения достаточно неудобно для экспериментаторов ввиду его сложности, а также трудности модельного анализа. По этой причине для T_b обычно используются модели в виде простых аналитических выражений, которые являются либо полуэмпирическими, либо являются аппроксимациями численного решения, либо являются приближенными решениями уравнения переноса излучения при некоторых упрощающих предположениях (например, однократного рассеяния). Эти выражения удобны для вычислений и модельного анализа. Их точность оценивается путем сравнения с численным решением или экспериментальными данными. При этом погрешность определения T_b обычно не превышает 3...6 К, что сопоставимо с погрешностью самой модели. Трех компонентная модель для радиояркой температуры почвы с растительностью получена [7,15,21] на основе приближенного решения уравнения переноса излучения. Ее применимость обоснована многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями. Модель широко используется для интерпретации данных СВЧ радиометрического зондирования системы почва – растительность. Радиояркая температура такой системы в указанной модели определяется для выбранной поляризации излучения выражением:

$$T_b = T_v(1 - r - q) + \kappa_s T_s q + T_v(1 - r - q)(1 - \kappa_s)q \quad (1)$$

где первый член в правой части характеризует излучение растительного слоя, второй – излучение почвы, ослабленное растительностью, третий – излучение растительности, отраженное от почвы и ослабленное растительным слоем, T_v – температура растительности, T_s – температура почвы, r – коэффициент отражения и q – коэффициент пропускания растительного слоя, κ_s – коэффициент излучения почвы. Коэффициенты r и q определяются ослаблением, рассеянием и индикатрисой рассеяния единичного объема растительной среды и, в общем случае, должны находиться из численного решения уравнения переноса излучения. Для практических применений эти коэффициенты представляются в виде аналитических аппроксимаций. В изотермическом случае, когда $T_v = T_s = T$, радиояркая температура системы почва - растительность представляется в виде [25], часто используемом исследователями для анализа,

$$T_b = T \{ \kappa_s e^{-2\tau} + (1 - r_0)(1 - e^{-2\tau}) \} = T_{bs} \beta + (1 - r_0)(1 - \beta)T, \quad (2)$$

где τ – интегральное ослабление излучения в растительном слое, r_0 – коэффициент отражения (альbedo) оптически толстого растительного слоя. Коэффициент передачи растительного слоя

$$\beta = e^{-2\tau} = \frac{\Delta T_b}{\Delta T_{bs}}$$

($T_{bs} = \kappa_s T$ – радиояростная температура почвы) в случае определения влажности почвы по данным СВЧ радиометрического зондирования показывает, во сколько раз снижается чувствительность радиояростной температуры к изменению влажности почвы при наличии растительности по сравнению с открытой почвой [719]. Модель (1), (2) имеет достаточно высокую точность, что подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями [21]. В то же время данная модель весьма проста и удобна для анализа. Параметрами модели являются радиояростная температура почвы, коэффициент передачи (интегральное ослабление излучения) растительности, коэффициент отражения растительного полупространства и температура растительности. Эти величины связаны с геофизическими и биометрическими параметрами почвы и растительности, что и делает возможным определение этих параметров по данным СВЧ радиометрических измерений. Связь параметров модели с параметрами почвы и растительности подробно рассматривается в [21].

С точки зрения моделирования СВЧ радиационных характеристик почвенный покров представляет собой полупространство с шероховатой поверхностью и характеризуется случайным пространственно-неоднородным распределением диэлектрической проницаемости, как по глубине, так и по поверхности. Для нахождения коэффициента излучения почвы необходимо в соответствии с законом Кирхгофа найти отношение суммарной интенсивности отраженного от почвы излучения, которое включает в себя когерентную (зеркальную) и некогерентную (диффузную) компоненты, к интенсивности падающего излучения и вычесть это отношение из единицы. Строгое решение такой задачи вряд ли возможно, что предопределило использование приближенных моделей почвенной среды. Проблема выбора любой физической модели объекта сталкивается с дилеммой: с одной стороны модель должна быть достаточно простой, чтобы по ней можно было что-нибудь посчитать, с другой стороны модель должна описывать характеристики объекта с приемлемой точностью. Простейшей моделью почвы является модель однородного диэлектрического полупространства с гладкой поверхностью. В этом случае имеется лишь зеркальная компонента отраженного излучения, интенсивность которой может быть найдена с использованием формул Френеля для коэффициента отражения [19]. Следующим шагом к уточнению модели является учет влияния изменения диэлектрической проницаемости с глубиной (неоднородного по глубине увлажнения). Наличие на поверхности почвы шероховатостей приводит к уменьшению когерентной компоненты отраженного излучения, но к появлению диффузно рассеянного излучения [1,31]. Оценки этих эффектов проводятся на основе теории малых возмущений (для шероховатостей с малыми по сравнению с длиной волны размерами) или на основе приближения Кирхгофа для пологих шероховатостей. Поскольку указанные эффекты с точки зрения нахождения суммарной интенсивности отраженного излучения частично

компенсируют друг друга, наличие шероховатостей не приводит к значительным отклонениям коэффициента излучения шероховатой поверхности от коэффициента излучения гладкой поверхности, рассчитанного по формулам Френеля. При моделировании СВЧ излучения почвы (а также при восстановлении параметров почвы и растительности по данным дистанционных СВЧ радиометрических измерений) базовой в настоящее время является модель однородного диэлектрического полупространства с гладкой поверхностью [19]. Неоднородное по глубине изменение диэлектрической проницаемости, наличие шероховатостей на поверхности почвы, неоднородность глубинного температурного профиля и пространственного распределения температуры в пределах пятна диаграммы приемной антенны рассматриваются как мешающие факторы, которые определяют статистический характер зависимости радиояркостной температуры от диэлектрической проницаемости (и, следовательно, влагосодержания) почвы. Введение указанных факторов в модель с последующей попыткой их оценки и уточнения получаемых данных о влажности почвы приводит к существенным практическим трудностям, а зачастую и принципиально невозможно.

Важным положением теории является связь диэлектрической проницаемости почвы с ее параметрами (плотностью, количеством свободной и связанной влаги, минерализацией почвенного раствора и др.) [19,24,36]. Наиболее применяемой в настоящее время является рефракционная модель диэлектрической проницаемости [19], хорошо согласующаяся с известными экспериментальными данными. Цикл экспериментальных исследований, проведенный в Алтайском государственном университете [37-39], подтвердил применимость рефракционной модели (с некоторыми эмпирическими поправками) для описания диэлектрических характеристик почвы. Следует подчеркнуть, что моделирование диэлектрических свойств почвы является самостоятельной научной задачей, представляющей как теоретический, так и практический интерес. Ввиду сложности объекта исследования, являющегося многокомпонентной статистической смесью диэлектриков, эта задача до конца не решена. Статистический характер объекта в любом случае обуславливает статистический разброс экспериментальных данных измерений относительно модельных зависимостей. Причем, зачастую, различия модельных значений для разных моделей лежат в пределах указанного разброса. Введение же в модель большого количества параметров для уменьшения этого разброса делает ее практическое применение неэффективным. Ввиду вышесказанного, а также с учетом статистического характера и самой радиационной модели, становится понятным стремление исследователей к упрощенным зависимостям (или модельным соотношениям), которые удобны для модельного анализа и решения обратной задачи. Анализ модельных расчетов и результатов многочисленных экспериментальных исследований показывает, что интенсивность СВЧ излучения почвы определяется главным образом количеством свободной влаги в единице объема почвы и практически не зависит от его типа и плотности. Сухой грунт характеризуется коэффициентом излучения близким к 0,9, что соответствует радиояркостной температуре 250...270 К при изменении температуры почвы от 0 до 30°C. Коэффициент излучения значительно увлажненной почвы, характеризующейся объемным содержанием свободной влаги 0,35 г/см³, составляет около 0,6, что соответствует яркостной температуре 165...180 К. Как видно, изменение влажности почвы в указанных пределах сопровождается уменьшением яркостной температуры почвы приблизительно на 110 К. При этом прочие факторы, как-то вариации плотности, температуры и степени шероховатости почвы в наблюдае-

мых на опыте пределах, приводят к изменению яркостной температуры почвы на 15...20 К, что обеспечивает определение до 6-10 градаций влажности открытой почвы по данным СВЧ радиометрических измерений.

Связь интегрального ослабления излучения в растительности с ее влагозапасом на единицу площади W установлена [7,35] на основе модели растительного покрова в виде совокупности малых по сравнению с длиной волны эллипсоидов:

$$\tau = A f \varepsilon_v'' W = b W, \quad (3)$$

где A – коэффициент, определяемый структурой растительного покрова, f – частота, ε_v'' – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости элементов растительности (листьев, стеблей и пр.), коэффициент b определяется частотой излучения и типом растительного покрова. Данное выражение до сих пор наиболее часто используется при моделировании растительности и интерпретации данных СВЧ радиометрических измерений [18]. Оно подвергалось теоретическому обоснованию и критическому анализу, а также всесторонней экспериментальной проверке. Выяснение спектральной зависимости b для покровов с элементами произвольных размеров, а также зависимости этого коэффициента от влагосодержания растительных элементов потребовало проведение обширных исследований и обобщение их результатов. Прежде всего, проведен ряд работ по моделированию и измерению сечений ослабления элементами растений различной формы, размеров и влагосодержания. Поскольку сечение ослабления элемента определяется их диэлектрической проницаемостью, проведены работы по моделированию и измерению диэлектрической проницаемости растительного материала. Кроме того, необходимо было систематизировать известные сведения о распределении растительной массы по элементам в растительном покрове течение периода вегетации и, при их отсутствии, провести целенаправленные биометрические измерения. На основе результатов упомянутых исследований получены спектральные зависимости коэффициента b для характерных типов растительных покровов [21]. Суммируя результаты исследований по установлению связи ослабления СВЧ излучения с биометрическими показателями растительности, можно сделать следующие выводы. Теоретически и экспериментально подтверждается линейная связь интегрального ослабления СВЧ излучения в растительных покровах на частотах ниже 7,5...10 ГГц. Модель (3) является в настоящее время общепризнанной и базовой при моделировании СВЧ излучения растительных покровов, интерпретации дистанционных СВЧ радиометрических измерений и восстановлении параметров почвы и растительности из этих измерений [31]. В дециметровом диапазоне теоретически и экспериментально установлено, что коэффициент b линейно зависит от частоты, и интегральное ослабление при

близких к надиру углах наблюдения может быть представлен в виде: $\tau = \frac{U}{\lambda} W$,

где W в $\text{кг}/\text{м}^2$, λ в см, τ в неперах, коэффициент $U = 3...5$ определяется типом растительного покрова. Значения коэффициента U целесообразно уточнять и вносить в базу данных на основе экспериментальных исследований и их статистической обработки. В сантиметровом диапазоне зависимость b от частоты более сложная. Кроме того, в сантиметровом диапазоне может наблюдаться зависимость b от влагозапаса растительности для густых растительных покровов.

Коэффициент отражения растительного слоя τ_0 определяется типом и состоянием (влагосодержанием) растительности. В СВЧ диапазоне его величина известна и не превышает 0,15 [21].

Определение характеристик почвы и растительности по данным СВЧ радиометрического зондирования

Модели (1), (2) являются основой для интерпретации данных СВЧ радиометрического зондирования земной поверхности при наличии растительного покрова. Определение параметров почвы и растительности проводится путем прямого обращения моделей [15], путем минимизации среднеквадратичного отклонения расчетных и измеренных значений радиоярких температур [31], путем использования нейросетевых алгоритмов восстановления параметров при обучении нейронной сети с помощью моделей (1), (2) [13]. Экранирующее влияние растительности при СВЧ радиометрии влажных почв учитывается при одночастотных измерениях априорным заданием коэффициента передачи растительного слоя. В дециметровом диапазоне естественные растительные покровы являются полупрозрачными ($\beta > 0,5$). Неточность задания коэффициента передачи при таких его значениях не сказывается существенно на точность определения влажности почвы. Наличие ярко выраженной спектральной зависимости коэффициента передачи позволяет проводить оценку, как влажности почвы, так и влагозапаса растительного покрова по данным спектральных СВЧ радиометрических измерений. Наиболее эффективным является применение СВЧ радиометрического метода для определения биометрических показателей растительного покрова, подстилаемого водной (посевы риса) или сильно увлажненной почвой (орошаемые поля) [21]. При этом точность определения биомассы посева оказывается сопоставимой с точностью наземных измерений. Использование моделей (1), (2) при интерпретации данных наземных, самолетных и спутниковых СВЧ радиометрических измерений является в настоящее время общепринятым и достаточно эффективным.

Проблема парникового эффекта

Проблема глобального круговорота углерода (ГКУ) привлекла за последние десятилетия особое внимание в связи с многочисленными, часто спекулятивными, объяснениями роли CO_2 в изменениях климата в будущем [9,14,28-30]. К сожалению, до настоящего времени отсутствует достаточно объективная оценка этой роли. Опубликованные недавно работы [1-5, 28-30] подвели первые итоги создания формализованной технологии оценки парникового эффекта за счет CO_2 с учетом роли наземных и океанических экосистем. Была показана интерактивная связь между глобальным круговоротом углерода в форме CO_2 и изменениями климата. Формализация этой связи основана на синтезе глобальной модели функционирования системы «природа-общество» (СПО) при учете пространственного распределения элементов этой системы, что позволяет свести в единую взаимосвязанную схему причинно-следственные соотношения потоков углерода между различными его биосферными и геосферными резервуарами. Как показывают многочисленные исследования, особую роль здесь играют наземные экосистемы, роль которых как стоков и источников углерода оценена очень неточно. Поэтому возникает задача развития новой технологии для уточнения потоков углерода в системе *атмосфера-растительность-почва*.

В недавно опубликованном первом докладе о международном проекте по изучению глобального круговорота углерода GCP (Global Carbon Project) [6] впервые сформулирована стратегия междисциплинарного сотрудничества в рамках широкого спектра проблем окружающей среды. Эти проблемы рассматриваются в контексте глобальной системы взаимодействий природы и человеческого общества при особом внимании к необходимости развития методик и информационных технологий для анализа системы «углерод-климат-общество» (СУКО). В качестве центральной цели отмечена необходимость рассмотрения следующих пяти аспектов общей проблемы глобального круговорота углерода, включающих:

- Изучение глобального круговорота углерода, которое должно основываться на интеграции природных и антропогенных компонентов путем интерактивного анализа взаимосвязей между энергетическими системами, базирующимися на ископаемом топливе, биогеохимическим круговоротом углерода и физической системой климата.

- Развитие новых методик анализа и численного моделирования интегрированного круговорота углерода.

- Глобальные исследования круговорота углерода, осуществляемые с учетом результатов национальных и региональных исследовательских программ по изучению потоков углерода между его резервуарами.

- Одной из стратегических задач международного проекта должен быть поиск путей устойчивого регионального развития с целью достижения стабилизации концентрации CO_2 в атмосфере.

- Отдельным аспектом GCP должно быть разделение всех стран на развитые и развивающиеся, чтобы в создаваемых технологиях имело место соответствующее расчленение промышленных, экономических и энергетических секторов СПО по их мощности как источников антропогенных выбросов CO_2 .

Круговорот углерода тесно связан с климатом, круговоротом воды и биогенных веществ, продукцией фотосинтеза на суше и в океанах. Поэтому все исследования ГКУ, не учитывающие совокупности подобных связей неизбежно обречены на неудачу и, естественно, не могут дать даже приближенно достоверных оценок последствий антропогенных выбросов углерода в окружающую среду. Именно по этой причине потерпели провал многие международные проекты по изучению парникового эффекта и его воздействия на климат, а также Киотский Протокол, регламентирующий выбросы CO_2 . Поэтому GCP вселяет надежду на достижение определенного успеха, благодаря планированию междисциплинарных исследований ГКУ. Однако предусматриваемые GCP исследования не включают применение методов микроволновой радиометрии для получения оперативной и достоверной информации о системе *атмосфера-растительность-почва*, что является серьезным недостатком GCP и, на наш взгляд, не приведет к желаемому результату.

Все это говорит о том, что продолжающиеся достаточно примитивные (в большинстве случаев) описания ГКУ и практическое отсутствие даже такой параметризации для других парниковых газов не может привести к надежным оценкам возможных изменений климата в будущем по причине антропогенной активности СПО. Декларируемая докладом [6] идея идентификации положений и мощностей источников и стоков CO_2 на суше и в Мировом океане не подкреплена серьезной и обоснованной мотивацией развития новых информационных технологий для комплексного анализа радиационного баланса Земли.

Тем не менее, следует отметить, что основной постулат GCP существенно продвигает понимание ГКУ, ориентируя базовую концепцию его исследований на сочетание природных и антропогенных компонентов с использованием уже развитых методик, алгоритмов и моделей. Основная структура круговорота углерода определяется его потоками между основными резервуарами, включая углерод атмосферы (главным образом в форме CO_2), в океанах (с делением на поверхностные, промежуточные и глубокие слои и донные отложения), в наземных экосистемах (растительность, подстилка и почва), в реках и эстуариях, в ископаемых топливах. Все эти резервуары должны изучаться с учетом их пространственной неоднородности и динамики под воздействием природных и антропогенных факторов, основываясь на накопленных знаниях.

Важнейшим звеном GCP является глобальный мониторинг окружающей среды с накоплением детальной информации о продукции наземных биомов, потоках CO_2 на границе «атмосфера-океан» и объемах антропогенных выбросов углерода. Особая роль отводится дистанционным спутниковым измерениям CO_2 с применением AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) на спутниковой обсерватории EOS-Aqua (запущена НАСА 4 марта 2002 г. на высоту 705 км.), IASI (Infrared Atmospheric Sounder Interferometer) на спутнике METOP (METeorological Operational Polar) [30]. Другие уже действующие или планируемые к запуску космические аппараты будут использованы для оценок потоков CO_2 по данным косвенных измерений характеристик окружающей среды. В частности, имеются в виду спутник TIROS-N (Television Infrared Observational Satellite – Next) и аппаратура SCIMASACHY (Scanning IMaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography). Последний спектрометр, запущенный в 2002 г., обеспечивает высокое спектральное разрешение полос поглощения таких парниковых газов, как CO_2 , CH_4 , H_2O (точность 1%) и N_2O , CO (точность 10%) с поверхностным разрешением от 30 до 240 км в зависимости от широты.

Программа GCP предусматривает расширенное изучение физических, биологических, биогеохимических и экофизиологических механизмов формирования потоков углерода в окружающей среде. Более глубокое понимание этих механизмов и их параметризация позволят уточнить модели ГКУ и связанных с ним изменений климата.

Новый подход к изучению парникового эффекта.

В ряде недавних работ [2,8,28] предложено рассматривать ГКУ в контексте его взаимосвязей с другими процессами в СПО. Как показано в [28], круговорот углерода зависит от множества факторов природного и антропогенного происхождения, взаимодействие между которыми формирует динамику ключевых процессов в СПО. Для CO_2 такими процессами являются обмены на границах атмосферы с земными покровами и акваториями морей и океанов. Ясно, что анализ динамики CO_2 в биосфере возможен при наличии данных о пространственном распределении его стоков и источников. Современный уровень знаний позволяет поставить и решить задачу уточнения оценок воздействий парникового эффекта на климат и, тем самым, уменьшить интервал неопределенности в оценках будущего изменения климата. Однако используемая при этом модель ГКУ должна отражать не только пространственную мозаику его резервуаров, стоков и источников, но и обеспечивать динамический расчет их мощностей. Сделанные до настоящего времени расчеты с помощью моделей ГКУ не в полной мере учитывали сведения о состоянии и классификации земных покровов, а тем более об изменчивости акваторий Мирового океана. Поэтому схема глобального круговорота углерода,

описанная в [27], нацелена на преодоление указанных выше недостатков других моделей. Система балансовых уравнений для такой схемы имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \alpha_S^i(\varphi, \lambda, z, t)}{\partial t} + V_\varphi \frac{\partial \alpha_S^i(\varphi, \lambda, z, t)}{\partial \varphi} + V_\lambda \frac{\partial \alpha_S^i(\varphi, \lambda, z, t)}{\partial \lambda} + \\ & + V_z \frac{\partial \alpha_S^i(\varphi, \lambda, z, t)}{\partial z} = \sum_{j \in \Omega_S} H_{jS} - \sum_{m \in \Omega_S} H_{Sm}, \quad (i=1, \dots, N); \end{aligned} \quad (4)$$

где S резервуар углерода в i -й ячейке (пикселе) пространственной дискретизации, φ - широта, λ - долгота, z - глубина, t - время, H_{jS} - поток углерода из j -го резервуара в резервуар S , H_{Sm} - сток углерода из резервуара S в m -й резервуар, Ω_S - множество резервуаров углерода, граничащих с резервуаром S ; N - число резервуаров углерода, $V(V_\varphi, V_\lambda, V_z)$ - скорость обмена между резервуарами.

В уравнении (4) скорость V и потоки H являются нелинейными функциями характеристик окружающей среды. Вид этих функций подробно описан в работе [28]. Остановимся здесь лишь на их уточнении. В первую очередь такого уточнения требуют элементы биогеоценотического блока глобальной модели, представленной в [28]. Для этого всю поверхность суши Σ покроем однородной сеткой географических пикселей $\Sigma_{ij} = \{(\varphi, \lambda): \varphi_{i-1} \leq \varphi < \varphi_i; \lambda_{j-1} \leq \lambda < \lambda_j\}$ с границами по широте $(\varphi_{i-1}, \varphi_i)$ и долготе $(\lambda_{j-1}, \lambda_j)$ и площадью σ . Количество пикселей определяется доступной базой данных, т.е. выбором размеров сетки $(\Delta\varphi, \Delta\lambda)$: $i=1, \dots, n$; $n = [180/\Delta\varphi]$; $j=1, \dots, k$; $k = [180/\Delta\lambda]$. В каждом таком пикселе возможно размещение N типов поверхностей, включая типы почвенно-растительных формаций, акваторий водных систем и антропогенных объектов. Динамика растительного покрова s -го типа подчинена закону:

$$\frac{dB_s}{dt} = R_s - M_s - T_s \quad (5)$$

где R_s - фотосинтез, M_s и T_s - потери биомассы B_s за счет ее отмирания и эвапотранспирации соответственно.

Компоненты правой части уравнения (5) являются функциями характеристик окружающей среды - освещенности, температуры, влажности атмосферы и почвы, концентрации CO_2 в воздухе. Существуют различные способы и формы параметризации этих функций. Одной из них является модель Collatz et al. [22], послужившая базой для глобальной биосферной модели SiB2 [33]. Температура, влажность и скорость испарения влаги в слое растительности и почве связаны зависимостями с биометрическими параметрами и энергетическими потоками в системе «атмосфера-растение-почва». При этом по аналогии с электростатикой вводится понятие «сопротивления» и потоки рассчитываются по простой формуле: *поток = разность потенциалов / сопротивление*. Модель SiB2 учитывает потоки собственного и скрытого тепла через испарение водяного пара для растительности и почвы, а потоки CO_2 разделяются по классам C_3 и C_4 , что существенно повышает точность параметризации функций правой части уравнения (2). Согласно [22], три фактора регулируют функцию R_s : эффективность фотосинтетической ферментной системы, количество фотосинтетически активной радиации (ФАР), поглощенное хлорофиллом клетчатки, и способность растительного вида к усвоению и экспорту во внешнюю среду продуктов фотосинтеза. Применение

принципа Либиха и учет данных о распределении типов растительных покровов по пикселям $\{\Sigma_{ij}\}$, о парциальных давлениях CO_2 и O_2 , о температуре и плотности атмосферы, об уровне освещенности позволяет рассчитать значения потоков H в уравнении (4) для всех пикселей суши.

Многие параметры глобальной модели круговорота углерода измеряются в режиме спутникового мониторинга, что дает возможность применить адаптивную схему расчета характеристик парникового эффекта (рис.1). Эта схема позволяет обучать модель в непрерывном режиме коррекции ее структуры и параметров. Действительно, спутниковые измерения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах обеспечивают оперативные оценки ФАР и таких характеристик растительности, как зеленость растительного полога, площадь живых фотосинтетически активных элементов, влажность почвы и содержание воды в элементах растительного покрова, концентрация CO_2 на поверхности листьев и др. Режим прогнозирования биомассы растительного покрова в каждом пикселе Σ_{ij} и сравнения со спутниковыми измерениями дает возможность корректировать отдельные фрагменты модели, например, применяя дублирование ее блоков или их параметрическую настройку с целью минимизации невязки между прогнозом и измерениями. В частности, для расчета первичной продукции имеется ряд полуэмпирических моделей, использование которых возможно по выборочному критерию в различных пикселях. Определенная свобода выбора имеется также при оценке величины испарения с растительного покрова [39].



Рис. 1. Адаптивный режим мониторинга парникового эффекта с оценкой роли растительного покрова суши и акваторий Мирового океана.

Повышение точности оценки климатического отклика на выбросы углекислого газа

Ключевой составляющей глобального круговорота углекислого газа являются его антропогенные выбросы в окружающую среду. Основной вопрос, который изучается в связи с этим большинством исследователей, состоит в оценке способности биосферы нейтрализовать избыточное количество CO₂. В табл. 1 и на рис. 2 приведены результаты моделирования. Видно, что из 6,3 ГтС/год, выброшенных в атмосферу промышленностью, в атмосфере остается 41,3%, а океаны и наземная растительность поглощают 20,2% и 38,5%, соответственно. Приняв за основу зависимость изменения температуры атмосферы от вариации CO₂ в виде [29]:

$$\Delta T_{CO_2} = -0,677 + 3,019 \ln[C_a(t) / 338,5],$$

для реалистического сценария на рис. 2 получаем оценку $\Delta T_{CO_2} \leq 2,4^\circ\text{C}$. Это значительно уточняет публикуемую многими авторами и принятую в Протоколе Киото оценку $\Delta T_{CO_2} \leq 4,2^\circ\text{C}$.

Таблица 1.

Модельные оценки поглощения избыточного CO₂ над территорией России.

Почвенно-растительная формация	Поток поглощаемого углерода в форме CO ₂ , млн т. С/ год
Арктические пустыни и тундры, субарктические луга и болота	2,2
Тундры	3,3
Горные тундры	3,6
Лесотундра	2,8
Северотаежные леса	10,8
Среднетаежные леса	31,2
Южнотаежные леса	22,9
Широколиственно-хвойные леса	4,8
Степи	3,6
Альпийские и субальпийские луга	1,1
Пустыни	2,2

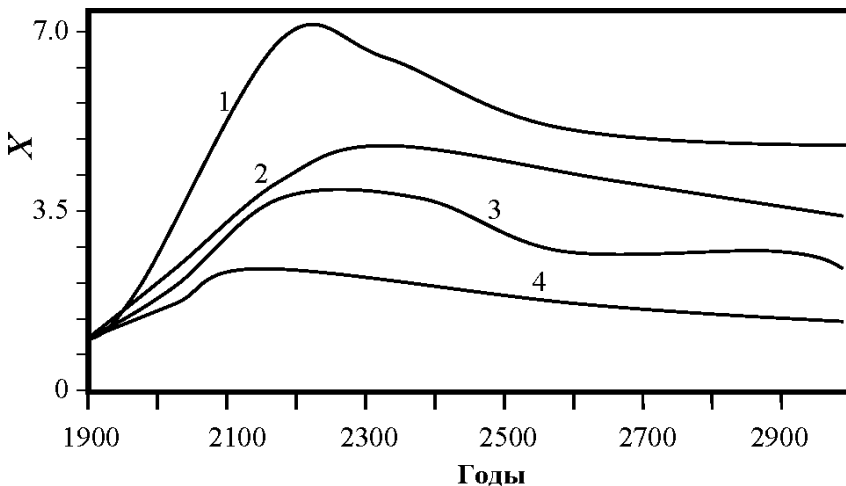


Рис. 2. Прогноз изменения глобальной температуры (ΔT , °C) за счет повышения концентрации CO_2 в атмосфере при различных подходах к моделированию глобального биогеохимического круговорота углерода:

- 1 – без учета пространственных неоднородностей биосферных процессов;
- 2- почвенно-растительные формации представлены 30 типами без учета сезонной зависимости их продуктивности, Мировой океан описывается точечной моделью;
- 3- вариант 2 с учетом сезонной зависимости продуктивности растительности от влажности почвы и температуры;
- 4- вариант 3 с делением Мирового океана на акватории по температурным градиентам и на 4 слоя по глубине.

Как видно из рис. 3, несоответствие форм распределения кривой поглощения CO_2 и вегетационного индекса наводит на мысль о том, что в южном полушарии необходимо уточнить структуру пикселей модели и их наполнение данными наблюдений. Тем не менее, внесение в модель ГКУ мозаики пикселей уже позволило оценить роль отдельных типов экосистем и территорий в регулировании парникового эффекта. Так из табл. 1 видна роль тайги на территории России в этом регулировании. В целом модель позволяет рассмотреть различные сценарии реконструкции земных покровов и изучить зависимость парциального давления CO_2 в атмосфере от их структуры. Например, если к 2050 г. площади лесов будут сокращены лишь на 10% по отношению к 1970 г. (≈ 42 млн. кв. км), то содержание атмосферного CO_2 к концу 21-го столетия может повыситься на 46,7% при стабильных антропогенных выбросах углерода около 6 ГтС/год. Наоборот, расширение площади лесов в северном полушарии на 10% снизит антропогенное воздействие на парниковый эффект на 14,8%.

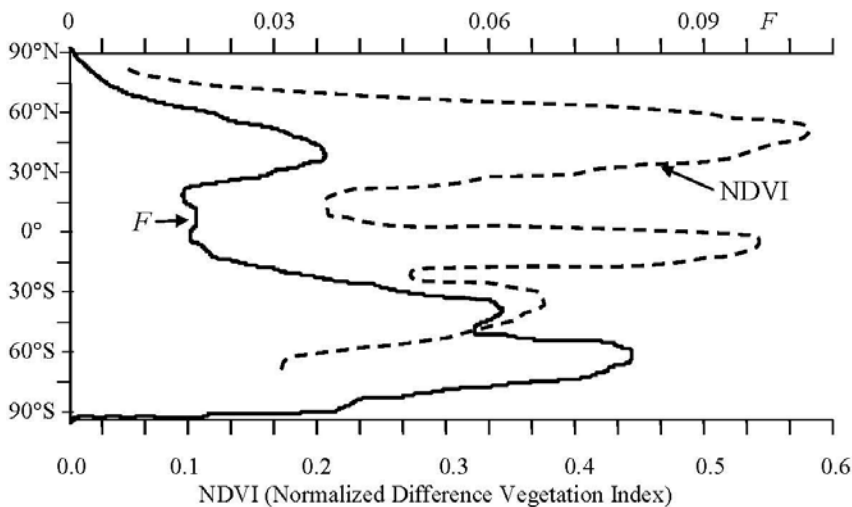


Рис. 3. Широтное распределение скорости F ($\text{ГтС}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{градус}^{-1}$) поглощения углерода (сплошная кривая) из атмосферы и вегетационного индекса (пунктирная кривая). Типы и пространственное распределение почвенно-растительных формаций определены в [8]. Промышленные выбросы CO_2 приняты равными $6,3 \text{ ГтС} / \text{год}$

Перспективные направления исследований.

Глобальное картирование яркостной температуры суши. Низкое пространственное разрешение СВЧ радиометрических средств дистанционного зондирования при их размещении на спутниках требует проведения модельного картирования яркостной температуры суши в глобальном масштабе. Такое картирование позволяет получить глобальные карты яркостных температур с разрешением, соответствующим пространственному разрешению спутниковой радиометрической системы при различном гидрологическом режиме почвы и состоянии растительности внутри элемента разрешения. Это дает возможность получения радиационно-влажностной зависимости для каждого элемента разрешения (пикселя) с учетом состояния и стадии вегетации растительного покрова, находящегося в пикселе. Яркостная температура пикселя находится при этом как сумма яркостных температур поверхностей (открытая почва, открытые водоемы, лес, почва с растительностью), входящих в пиксель, с учетом их относительной площади заполнения пикселя. При расчете яркостных температур леса и почвы с растительностью используется модель (1), (2) при зависимости интегрального ослабления от влагозапаса (3).

Глобальное картирование ослабления СВЧ волн растительностью. Повышение точности глобального модельного картирования яркостной температуры поверхности суши возможно при использовании развитых модельных представлений об ослаблении СВЧ излучения растительными покровами совместно с ГИМС технологиями. ГИМС – это новое направление глобального мониторинга, объединяющее геоинформационные системы и модели развития изучаемых объектов. Так глобальное картирование ослабления СВЧ волн растительными покровами может осуществляться на базе электродинамических моделей, данных геоинфор-

мационных систем о глобальном распределении и биометрических показателях растительности и моделей развития растительных сообществ.

Контроль составляющих энергетического баланса геосистем и их состояния. Состояние растительного покрова как геосистемы описывается набором параметров состояния или оцениваться соотношением составляющих уравнения энергетического баланса для геосистемы. Возможность оценки состояния растительных сообществ по данным СВЧ и ИК зондирования показана. Для нахождения отклонения текущего состояния системы от оптимального по дистанционным данным используется модель (2). Данный подход в сочетании с ГИМС технологиями представляется перспективным для оценки характеристик процессов переноса влаги и тепла на границе поверхности суши и атмосферы.

Разработка нейросетевых алгоритмов оценивания параметров почвы и растительности. Перспективным представляется использование нейросетевых алгоритмов при оценке параметров земной поверхности по данным дистанционного радиофизического зондирования. Нейросетевые алгоритмы по производительности конкурируют с традиционными методами обработки дистанционных данных, основанными на обращении радиационных моделей. Обучение нейронных сетей требует репрезентативного набора экспериментальных данных, не всегда наличествующего при измерениях. Поэтому используется смешанное обучение нейронной сети радиационной моделью и ограниченной экспериментальной выборкой.

Прогнозирование природных катастроф. Достижение высокой надежности оценок изменений климата, возникающих по естественным и антропогенным причинам, за счет комплексного применения эффективных методов моделирования климатических процессов и технологий спутникового мониторинга позволит снизить риск и потери от природных катастроф. В математике теория катастроф хорошо развита. Но ее применение к описанию событий и процессов в реальном окружающем пространстве требует применения методов системного анализа для синтеза глобальной модели системы «Природа-Общество» с привлечением технических средств спутникового мониторинга. Решением возникающих здесь проблем занимается экойнформатика, которая обеспечивает совмещение аналитических простых, полуэмпирических и сложных нелинейных моделей экосистем с обновляемыми глобальными базами данных. Многие международные и национальные программы изучения окружающей среды, имея определенную проблемную и пространственную ориентацию, в последнее время повысили уровень тематической координации, чтобы достичь необходимого уровня эффективности.

Заключение

Вопрос о глобальном потеплении климата за счет роста концентрации парниковых газов – это проблема устойчивого развития цивилизации. Предложенный в данной работе подход позволяет синтезировать уже накопленные данные и знания о ГКУ и других парниковых газов в единую систему мониторинга. К сожалению, начатая международная программа по изучению ГКУ [20], как и другие аналогичные программы глобального характера, не нацелена на развитие конструктивной информационной технологии, способной существенно повысить надежность прогнозных оценок будущего изменения климата. Тем не менее, идеи и подходы российских специалистов, опубликованные в последнее время [2,14,28,29], а также модели американских ученых [22,33], позволят, хотя и не в рамках ГСР, преодолеть имеющуюся разрозненность исследований ГКУ и создать глобальную модель, способную в оперативном режиме спутникового мони-

торинга давать надежные оценки роли регионов в динамике парникового эффекта. Такая модель послужит инструментом выработки эффективной стратегии природопользования и, безусловно, приведет к принятию обоснованных (в отличие от Протокола Киото) международных решений.

Список литературы

1. *Арманд Н.А., Шутко А.М.* Дистанционное определение влажностных свойств земных покровов радиотеплокационными средствами. Проблемы, решения, использование в народном хозяйстве. В кн.: Проблемы современной радиотехники и электроники. М.: ИРЭ АН СССР, 1983, с. 140.
2. *Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В.* Глобальные обобщенные модели динамики углекислого газа // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2003. №12. С. 11-28.
3. *Башаринов А.Е., Зотова Е.Н., Наумов М.И., Чухланцев А.А.* Радиационные характеристики растительных покровов в СВЧ диапазоне // Радиотехника, 1979, т.34, № 5, с. 16-24.
4. *Башаринов А.Е., Шутко А.М.* Измерение влажности земных покровов методами сверхвысокочастотной радиометрии // Метеорология и гидрология, 1971, № 9, с. 17.
5. *Башаринов А.Е., Шутко А.М.* Измерение влажности земных покровов методами СВЧ-радиометрии (обзор) // Радиотехника и электроника, 1978, т. 23, № 9, с. 1778.
6. *Демирчян К.С., Кондратьев К.Я.* Глобальный круговорот углерода и климат // Известия Русского географического общества. 2004. Т. 136. Вып. 1. С. 16-25.
7. *Кирдяшев 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.
8. *Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф.* Глобальный круговорот углерода и климат // Исследование Земли из космоса. 2003. № 1. С. 3-15.
9. *Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Потапов И.И.* Мониторинг экологических катастроф // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2003. №12. С. 52-60.
10. *Миронов В.Л., Комаров С.А., Клещенко В.Н.* Влияние засоленности на диэлектрические свойства влажных грунтов при положительных и отрицательных температурах // Исследование Земли из космоса. 1997, № 2, с. 37-44.
11. *Миронов В.Л., Комаров С.А., Клещенко В.Н.* Влияние связанной воды на диэлектрические свойства увлажненных мерзлых грунтов // Исследование Земли из космоса. 1996, № 3, с. 3-10.
12. *Миронов В.Л., Комаров С.А., Рычкова Н.А., Клещенко В.Н.* Изучение диэлектрических свойств влажных почвогрунтов в СВЧ диапазоне // Исследование Земли из космоса. 1994, № 4, с. 18-24.
13. *Назаров Л.Е., Чухланцев А.А., Шутко А.М., Головачев С.П.* Нейросетевые алгоритмы оценки влажности почвы с использованием данных пассивной СВЧ-радиометрии. // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2003, № 12, с. 20-29.
14. *Сорохтин О.Г.* Парниковый эффект: миф и реальность // Вестник РАЕН. 2001. Т.1. № 1. С. 8- 21
15. *Чухланцев А.А., Шутко А.М.* Об учете влияния растительности при дистанционном СВЧ радиометрическом зондировании земных покровов // Исследование Земли из космоса. № 2, 1988, с. 67-72.

16. Чухланцев А.А., Шутко А.М. Применение СВЧ радиометрического метода для определения биометрических характеристик растительного покрова // Исследование Земли из космоса, 1987, № 5, с. 42-48.
17. Чухланцев А.А., Шутко А.М. Экранирующее влияние растительности в задачах дистанционного радиофизического зондирования // Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1982, № 2, с. 80-82.
18. Чухланцев А.А., Шутко А.М., Головачев С.П. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами // Радиотехника и электроника, 2003, т. 48, №11, с. 1283-1311.
19. Шутко А.М. СВЧ радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986, 190 с.
20. Canadel I.G., Dickinson R., Hibbard K., Raupach M., and Young O. (eds.). Global Carbon Project.: The Science Framework and Implementation. Report No.1. Earth System Science Partnership. Canberra. 2003. 69 pp.
21. Chukhlantsev A. A. Microwave emission and scattering from vegetation canopies // Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 1992, Vol. 6, No. 8, pp. 1043 – 1068.
22. Collatz G.J., Ball G.J., Grivet J.T., Berry J.A. *Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer* // *Agric. For. Meteorol.*, 1991. Vol. 54. pp. 107-136.
23. Coppo P., Luzzi G., Paloscia S, and Pampaloni P. Effect of soil roughness on microwave emission: Comparison between experimental data and models // Proc. IGARSS'91, 1991, pp. 1167-1170.
24. Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., and El-Rayes M.A. Microwave dielectric behavior of wet soil – Part II: dielectric mixing models // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1985, Vol. 23, pp. 35-46.
25. Jackson T.J., Hsu A.Y., Shutko A.M. et al. Priroda microwave radiometer observation in the Southern Great Plains 1997 hydrology experiment // Int. J. Remote Sensing, 2002, Vol. 23, No. 2, 231-248.
26. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Phillips G.W. Global Environmental Change: Modeling and Monitoring, Springer, Berlin, 2002, 319 pp.
27. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Varotsos C.A. Global Carbon Cycle and Climate Change. Springer/PRAXIS, Chichester, U.K., 2003, 343 pp.
28. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A., and Savinikh V.P. Global Ecodynamics: A Multidimensional Analysis. Springer/PRAXIS. Chichester. 2004. 549 pp.
29. Mintzer I.M. A matter of degrees: the potential for controlling the greenhouse effect. World Resources Institute Research Report . Washington.1987. № 15. 70 pp.
30. Nishida K., Nemani R.R., Glassy J.M. and Running S.W. (2003). Development of an evapotranspiration index from Aqua/ MODIS for monitoring surface moisture status // IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, vol. 41, no. 2, pp. 493-501.
31. Njoku E.G., Jackson T.J., Lakshmi V. et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Feb. 2003, vol. 41, pp. 215229-26.
32. Rayner P.S. and O'Rrien O.M. The utility of remotely sensed CO₂ concentration data in surface source inversions // Geophys. Res. Lett. 2001. Vol. 28. pp. 175-178.
33. Sellers P.J., Randall D.A., Collatz G.J., Berry J.A., Field C.B., Dazlich D.A., Zhang C., Collelo G.D., and Bounoua L. (1996 c). A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 1: Model formulation // Journal of Climate. 1996. Vol. 9. No. 4. pp. 676-705.

34. *Shutko A.M.* Microwave radiometry of lands under natural and artificial moistening // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Jan. 1982, vol. 20, pp. 18-26.
35. *Shutko A.M. and Chukhlantsev A.A.* Microwave radiation peculiarities of vegetative covers // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Jan. 1982, vol. 20, pp. 27-29.
36. *Shutko A.M. and Reutov E.A.* Mixture formulas applied in estimation of dielectric and radiative characteristics of soils and grounds at microwave frequencies // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Jan. 1982, Vol. 20, p. 29.
37. *Silvestrin P., Berger M., Kerr Y.H., and Font J.* ESA's second Earth explorer opportunity mission: The soil moisture and ocean salinity mission – SMOS // IEEE Geosci. Remote Sensing Society Newsletter, March 2001, pp. 11-14.
38. *Wang J.R.* Passive microwave sensing of soil moisture content: The effect of soil bulk density and surface roughness // Remote Sens. Environ., 1983, Vol.13, pp. 329-344.
39. *Wange G. and Archer D.J.* Evaporation of groundwater from arid play as measured by C-band SAR // IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. No. 7. pp. 1641-1650.
40. *Watson R.T., Noble I.R., Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D.J., Dokken D.J.* Land use, land-use change, and forestry. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 2000. 377 pp.
41. *Wigneron J.P., Laguerre L., and Kerr Y.H.* A simple parameterization of the L-band microwave emission from rough agricultural soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Aug. 2001, Vol. 39, pp. 1697-1707.