

В.Г. Бондур
академик РАН
(Центр проблем аэрокосмического мониторинга
«АЭРОКОСМОС», Москва)
В.Ф. Крапивин
д-р физ.-мат. наук
(Фрязинский филиал Института радиотехники и электротехники
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл.)
И.И. Потапов
канд. техн. наук
(Всероссийский институт научной и технической
информации РАН, Москва)
V.G. Bondur
V.F. Krapivin
I.I. Potapov

МЕТОДЫ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

AEROSPACE DIAGNOSTICS OF THE FOREST ECOSYSTEMS

Обсуждены вопросы синтеза гибкой информационно-моделирующей системы с функциями оперативной диагностики лесных экосистем. Приведены алгоритмы оценки биометрических и производственных характеристик лесов по данным спутниковых измерений. Предложена структура архива биометрических и производственных характеристик лесных экосистем и охарактеризованы основные его составляющие.

Ключевые слова: лесные экосистемы; аэрокосмическая диагностика; информационно-моделирующие системы.

The questions of syntheses of flexible information-modeling system with the functions of operative diagnostics of the forest ecosystems are discussed. Algorithms for the evaluation of biometric and production characteristics of the forests by means of the satellite measurements are given. Structure of biometric and production characteristics for the forest ecosystems is proposed and its basic items are characterized.

Key words: forest ecosystems; aerospace diagnostics; information-modeling system.

Введение

Оперативная оценка состояния лесных экосистем приобретает все большую значимость в связи задачами рационального использования лесов и необходимостью сохранения их стабилизирующей роли в проблеме глобального изменения климата. Несмотря на противоречивость этих задач, потребность в научном обосновании стратегии использования лесов неразрывно связана с необходимостью создания такой информационной технологии, которая бы обеспечивала достоверную оценку и прогноз состояния лесных экосистем и давала рекомендации по принятию сбалансированных решений при выборе стратегии лесопользования.

К сожалению, отсутствие до недавнего времени такой технологии привело к ситуации, когда на территории России, обладающей огромными территориями лесов (более 22 % всех лесов мира), согласно Киотскому протоколу введены ограничения по выбросам углекислого газа. Нанесенный ущерб легко оценивается, если учесть стоимость разности между объемами выбрасываемых в атмосферу и поглощаемых лесами России парниковых газов. Ведь вклад лесов России по самым заниженным оценкам в поглощение CO₂ из атмосферы составляет 25 % или не менее 1,5 ГтCO₂/год при выбросах не более 0,5 ГтCO₂/год [1, 2]. При стоимости выброса одной тонны CO₂ 8,8...17,75 долл. США [3] Россия могла бы получать дополнительно 8,8...17,75 млрд долл. США ежегодно за продажу квот на выбросы парниковых газов.

Поэтому разработка технологии для оперативной диагностики состояния лесов России является актуальной задачей, имеющей важное национальное значение наряду с другими крупномасштабными природоохранными проектами. Идея такой технологии была выдвинута в работе [4]. Одним из элементов такой технологии является архив биометрических и производственных характеристик растительности (АБПХР). Его создание диктуется потребностями и задачами изучения роли растительных ценозов в регулировании изменений характеристик окружающей среды, происходящих по естественным и антропогенным причинам. Очевидно, что от точности параметризации этих изменений существенно зависит надежность прогнозов и оценок рисков от принимаемых решений при реконструкции земных покровов. Дискуссии, которые в последние годы были инициированы Киотским протоколом в основном подтверждают эту потребность в создании такого архива, т.к. без детального знания биометрических, эколого-фитоценотических и сукцессионных характеристик растительных покровов, особенно лесов, невозможно рассчитать потоки основного парникового газа – CO₂ на границе раздела суши–атмосфера [5, 6].

Проблема создания АБПХР для своего решения требует привлечения существующих или создания новых систем дистанционного мониторинга, информационные потоки от которых должны быть верифицированы с помощью соответствующих наземных систем сбора данных о растительных покровах.

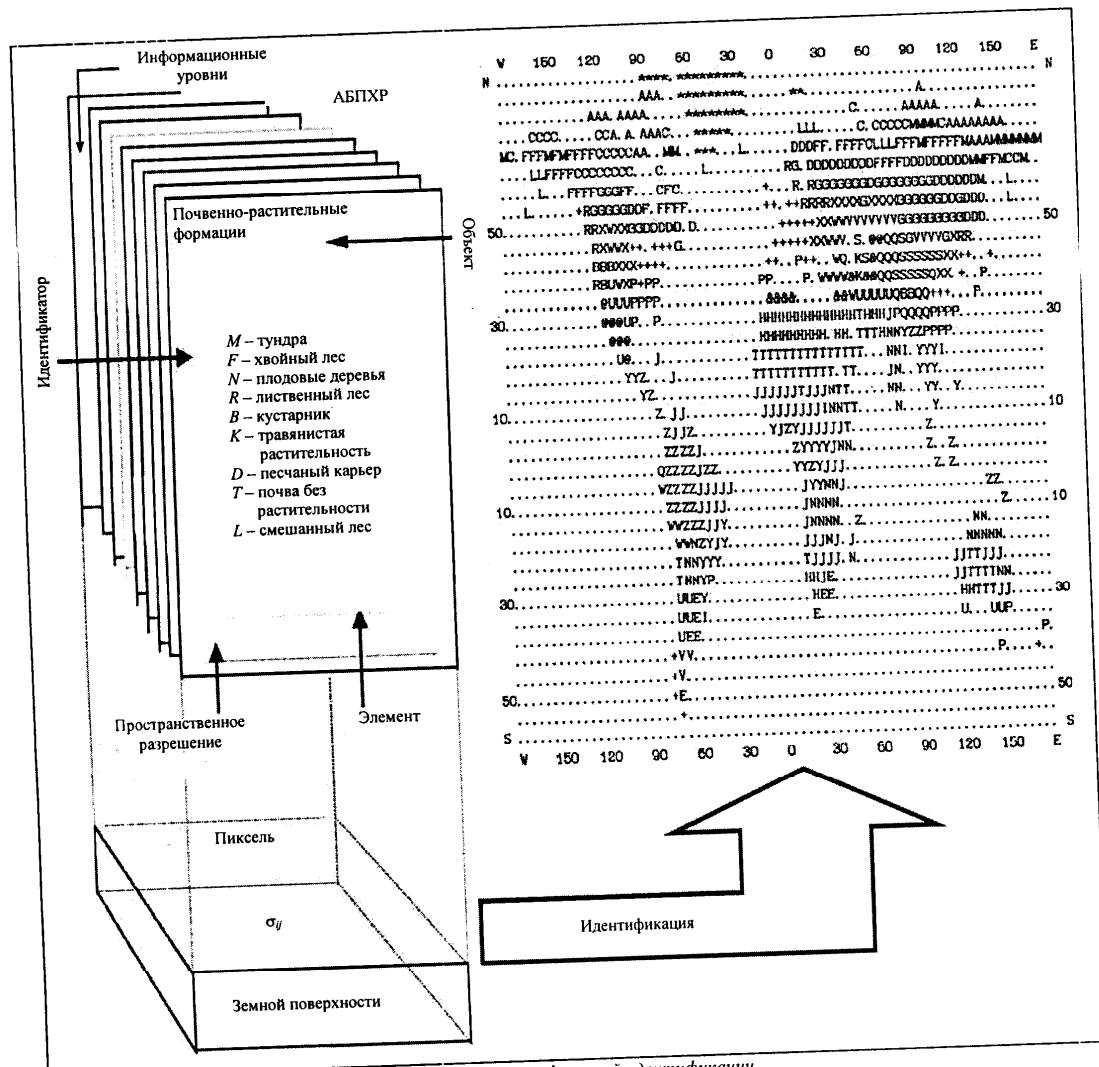


Рис. 1. Информационные уровни АБПХР и схемы их картографической идентификации

Многие спутниковые системы, информация с которых позволяет осуществлять оперативный мониторинг земных покровов, оснащены устройствами высокого пространственного разрешения, что позволяет идентифицировать детальные элементы земных покровов и определять характерные однородные образования. Это обстоятельство упрощает процедуру расчета биометрических и продукционных характеристик растительности. В частности сигналы спутниковых систем навигации ГЛОНАСС и GPS (применимые частоты 1 176,45; 1 227,6 и 1 575,42 МГц) можно использовать для определения биометрических характеристик лесного полога. Действительно, одновременно с определением координат местности

на основе регистрации рассеянного лесным пологом микроволнового поля приемниками сигналов ГЛОНАСС/GPS при наличии соответствующих алгоритмов, устанавливающих связь компонентов электромагнитного поля с биометрическими параметрами полога леса, возможно восстановление этих характеристик.

Использование эффектов изменения компонентов электромагнитного поля в пологе леса требует дополнительных исследований. В общем случае лесной полог может быть параметризован слоистой структурой – неоднородной средой, в которой реализуется многократное рассеяние электромагнитного излучения. Существует множество моделей этого

рассеивания, позволяющих рассчитывать распределения электрофизических параметров лесного полога, на основе которых можно оценивать комплексную диэлектрическую проницаемость, знание которой необходимо для решения обратных задач по определению характеристик лесного полога. Известно, что, например, для сомкнутого хвойного древостоя эффективная диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость примерно равны $\epsilon=1,03$ и $\sigma=7 \cdot 10^{-4}$ (Ом/м). Знание таких оценок для различных типов лесных экосистем позволяет решить задачу оценки биометрических и продукционных характеристик леса на основе данных дистанционного зондирования в радиодиапазоне [7].

В работе рассмотрена возможная структура АБПХР и обсуждены алгоритмы его наполнения.

Архитектура АБПХР

Основой создания архива долговременного хранения характеристик растительных покровов являются базовые пространственные структуры распространения почвенно-растительных формаций. Поэтому первый уровень АБПХР включает в себя набор картосхем с указанием в каждом пикселе пространственной дискретизации земной поверхности одного типа растительности. Пользователю АБПХР достаточно указать размеры пикселя, чтобы software, сопровождающее АБПХР, автоматически выбрало на первом уровне соответствующую картосхему согласно процедуре топологической привязки, представленной на рис. 1. Таким образом, структура АБПХР включает в себя следующие основные уровни (рисунки 2 и 3):

- 1) шкалы пространственной географической дискретизации земной поверхности;
- 2) картосхемы с указанием типов растительности в каждом пикселе пространственной дискретизации земной поверхности;
- 3) биометрические и продукционные характеристики растительности в каждом пикселе земной поверхности.

Информационная система управления АБПХР, которая должна обеспечивать доступ и обслуживание заказов пользователей архива охарактеризована на рис. 4.

Определение биометрических и продукционных характеристик лесных экосистем

Одним из важных элементов АБПХР является раздел, содержащий данные для пикселей с лесами. Наиболее информативными биометрическими характеристиками, используемыми в различных параметризациях глобального биогеохимического круговорота углерода, являются высота дерева, максимальный диаметр кроны, высота до максимального диаметра кроны, высота до начала кроны, диаметр дерева на высоте 1,3 м, протяженность и средний диаметр освещенной части кроны, объемы ствола

и кроны, плотность стволов в пикселе и др. Оценка этих характеристик растений требует знаний об их физиологии, которая характеризуется такими признаками как продуктивность, индекс листовой поверхности, скорость роста, сезонная ритмика и адаптационные возможности к стрессовым нарушениям параметров окружающей среды. Сложность возникающих при этом проблем определяется тем обстоятельством, что растения интерактивно связаны с окружающей средой, являясь одним из регуляторов ее абиотических и биотических факторов.

Поскольку хозяйственная эксплуатация лесов неизбежна, то одной из проблем современной биоценологии является разработка технологий сбалансированного лесовосстановления. Здесь важно обладать знанием того, какая структура молодняка может возникать на вырубках и каков ход возрастных сукцессий. Более того, необходимо планировать соотношение лесонасаждения с естественным воспроизведением леса. Для решения возникающих здесь задач необходимо создавать модели лесовозобновления, чтобы можно было выявлять условия устойчивого, лабильного и критического состояния молодняков, а также выбирать наиболее целесообразное время для хозяйственного воздействия на лесной биогеоценоз с учетом прогноза его возрастной сукцессии и будущей структуры. Наряду с моделированием процесса лесовозобновления необходимо осуществлять наблюдения за контрольными вырубками, чтобы иметь данные для верификации моделей. Реализации возникающих здесь задач посвящены многие национальные и международные программы, нацеленные на развитие комплекта моделей лесных экосистем, ориентированных на различных потребителей лесной продукции [8].

Последние достижения систем дистанционного мониторинга растительных покровов связаны с успешным определением таких характеристик, как:

1. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – показатель относительной яркости растительного полога, рассчитываемый по данным измерений в двух каналах радиометра высокого разрешения AVHRR (видимый диапазон – 580...680 нм и ближний инфракрасный диапазон – 725...1 000 нм).

2. LAI (Leaf Area Index) – показатель важного структурного свойства растительного полога, отражающего долю площади лиственного покрова на единице площади территории, занимаемой растительностью.

К сожалению, известные методы оценки LAI дают расходящиеся результаты. Это связано с тем, что площадь листьев или хвои сильно изменяется в течение года и является функцией многих параметров окружающей среды. Среднегодовой ход LAI для лиственных деревьев достигает максимума в течение высшей точки сезона роста, в то же время LAI для хвойных деревьев изменяется слабо от года к году.

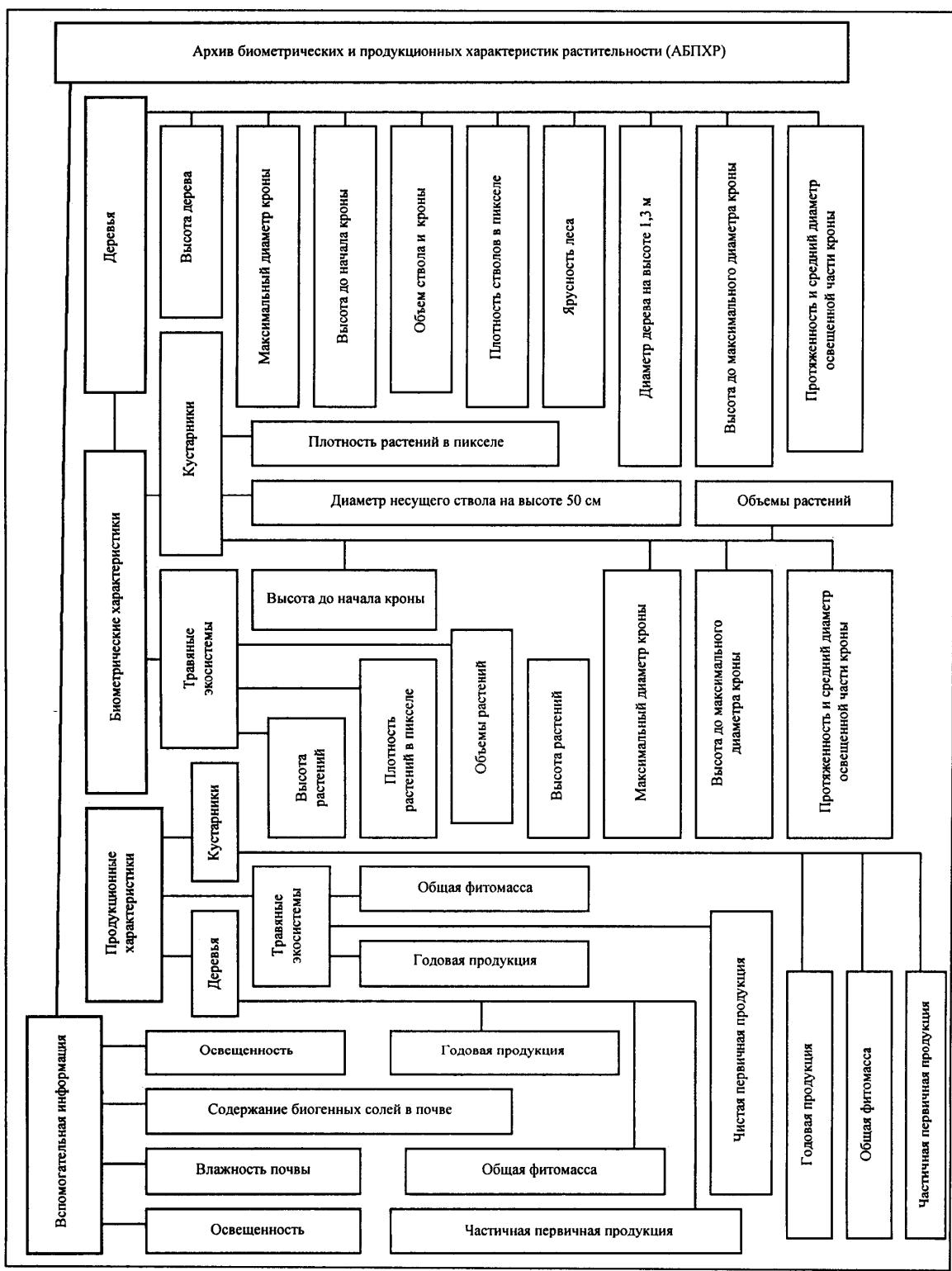


Рис. 2. Структура АБПХР

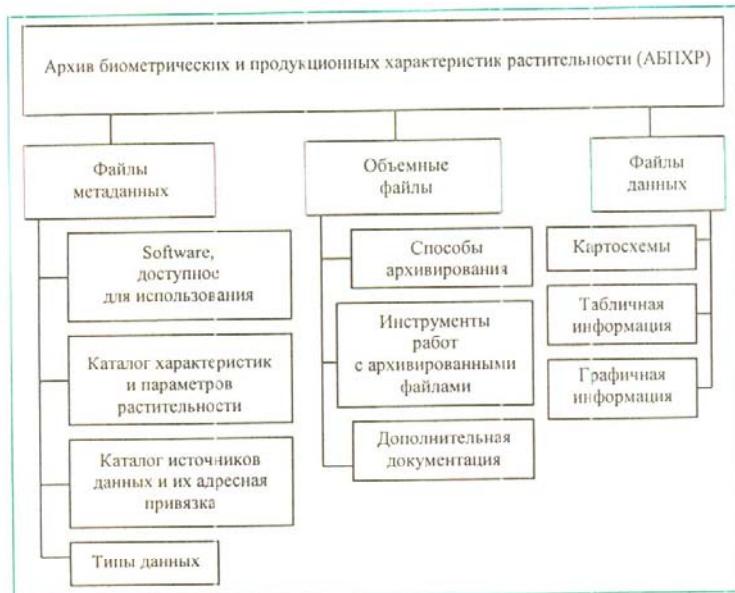


Рис. 3. Основные информационные элементы АБПИХР

Некоторые лиственные деревья сохраняют старые листья вплоть до следующего сезона бутонизации, в то время как другие деревья полностью сбрасывают их. В результате возникает несоответствие между смыслом LAI в этих ситуациях. С одной стороны, старые листья помогают задерживать воду, и с них она может испаряться, но с другой – они не участвуют в фотосинтезе. Поэтому полный индекс площади листа L_T складывается из индекса площади отмерших листьев L_d , индекса площади зеленых листьев L_e и индекса площади сучьев L_s

$$L_T = L_d + L_e + L_s.$$

3. FPAR (Fraction of Photosynthetically Active radiation) – доля доступной радиации в фотосинтетически активном диапазоне волн (400...700 нм), которая поглощается растительным пологом. Здесь вводятся различные детализации типа APAR (absorbed PAR) – поглощенная зеленым пологом, почвой и подстилкой энергия Солнца в процессе фотосинтеза. Оценка

APAR дистанционными методами достигается за счет измерения падающей энергии на поверхность Земли и ее части, поглощенной пологом.

4. NPP (Net Primary Production) – разность между полной продукцией фотосинтеза и потерями биомассы на дыхание и отмирание (скорость, с которой в экосистеме происходит накопление биомассы).

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

6. SR (Simple Ratio), RSR (Reduced Simple Ratio) – характеристики растительного покрова, аналогичные NDVI, рассчитываемые по измерениям с Landsat.

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

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

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

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

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

10. WVDVI (Weighted Difference Vegetation Index), IWWDVI (Inverse WVDVI) – показатели плотности растительного покрова, числа лиственных слоев и количества компонент почвы, различаемых сенсором. Рассчитываются по формулам: $WVDVI = r_{NIR} - gr_{Red}$, $IWWDVI = r_{Red} - gr_{NIR}$, где g – наклон поверхности; r_{NIR} и r_{Red} – спектральная яркость в ближнем инфракрасном и красном диапазонах соответственно.

Изучению особенностей перечисленных характеристик и способов их расчета посвящены многочисленные работы. Наибольший интерес вызывают LAI

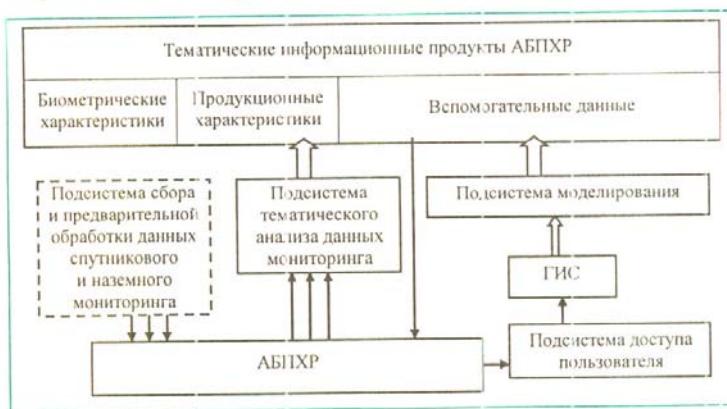


Рис. 4. Структура информационной системы обслуживания и управления АБПИХР

и FPAR, спутниковые технологии оценки которых достаточно хорошо развиты [9]. Эти характеристики, являясь биометрическими переменными, описывают структуру полога и связаны со скоростью функционального процесса обмена энергией и массы, а также широко используются для вычисления поверхностного фотосинтеза, эвапотранспирации и NPP. Эти параметры позволяют рассчитывать потоки энергии, углерода и воды на поверхности растительного покрова и являются базовыми компонентами биогеохимии растительного сообщества. Показатель LAI, рассчитанный для любого региона, обеспечивает оценку FPAR [10]:

$$FPAR = a(1 - e^{-kLAI}),$$

где a – константа, оцениваемая в полевых наблюдениях; k – коэффициент ослабления света.

Использование LAI и NDVI помогает рассчитать содержание воды в пологе леса, кг/м²

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

$$m_v = \beta \cdot LAI.$$

Также часто применяются другие формулы, по-добные перечисленным далее:

$$\text{PAR} = \begin{cases} 93,5[1,0 - \exp(-0,9\text{LAI})] - \\ \text{перед озеленением полога леса,} \\ 93,5[1,0 - 0,2 \exp(-0,95\text{LAI})] - \\ \text{после озеленения полога леса.} \end{cases}$$

$$\text{NPP} = \text{GPP} - R = \text{APAR} \cdot \epsilon_g = \text{FPAR} \cdot \text{PAR},$$

где R – респирация растений; $\epsilon_g = \epsilon_{\max} f(T_a) f(\phi)$, ϵ_{\max} – максимальная эффективность, с которой световая энергия преобразуется в сухое вещество при росте деревьев в благоприятных условиях окружающей среды; $f(T_a)$ и $f(\phi)$ – показатели уменьшения скорости поглощения света в зависимости от изменения температуры атмосферы и дефицита влаги соответственно.

В зависимости от решаемой задачи и сложности ситуации дистанционного мониторинга многими авторами вносятся различные уточнения и модификации при расчете указанных параметров. Например, что такая площадь лиственного покрова для хвойных деревьев или в случае смешанных растительных покровов. Как правило, для широколиственных пологов под площадью поверхности листа понимается его площадь с одной стороны его поверхности. Для хвойных деревьев наиболее распространены три определения:

- полная площадь игл над единицей площади земной поверхности;
- половина площади игл над единицей площади земной поверхности;
- спроектированная площадь игл на единицу площади земной поверхности.

LAI измеряется как прямыми, так и косвенными методами. Прямой метод основан на использовании специализированных измерителей, таких как LAI-2000 [11]. Косвенный метод основан на расчете разности освещенности на поверхности полога и уровне почвы под пологом. При этом возможен расчет LAI при решении обратной задачи, используя корреляционные связи LAI с другими характеристиками растительности. Одной из таких зависимостей является широко применяемая многими авторами формула зависимости между первичной продукцией (PP – primary production) и показателем перехвата энергии солнца пологом леса [10]

$$PP = PP_{\max} (1 - e^{-cLAI}),$$

где c – удельный коэффициент фотосинтеза (который часто принимается равным единице или $0,5/\cos\theta$; θ – зенитный угол Солнца).

В свою очередь PP непосредственными измерениями со спутников NDVI может быть рассчитана по соответствующим моделям

$$\text{NDVI} = \frac{a_n - a_v}{a_n + a_v},$$

где a_n и a_v – полусферические яркости в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, конкретизируемых в зависимости от конкретного сенсора. При измерениях с помощью AVHRR используются первый ($0,58\dots0,68$ мкм) и второй ($0,725\dots1,1$ мкм) каналы радиометра. Глобальная база оценок NDVI с пространственным разрешением 5 км×5 км создана с помощью серии спутников NOAA, оснащенных радиометрами типа AVHRR (advanced very high resolution radiometer). По сетке $1^\circ \times 1^\circ$ ряды NDVI созданы с месячным разрешением во времени.

Измерения и оценки NDVI зависят от зенитного угла Солнца θ , учет которого осуществляется по формуле

$$\Delta\text{NDVI} = [\text{NDVI}(\pi/6) - \text{NDVI}(0)] / \text{NDVI}(\pi/6) = 0,739\Delta\theta^{0.62},$$

где $\Delta\theta = (\theta - \pi/6)$; угол θ измеряется в радианах.

Кривые рис. 5 характеризуют ряды NDVI, полученные с помощью радиометра AVHRR при визиривании в надир. Тогда GVI рассчитывается по формуле

$$\text{GVI} = \text{GVI}(\theta) / (1 - \Delta\text{NDVI}).$$

Простейшая модель расчета NPP сводится к формуле

$$\text{NPP} = \text{GPP} - R,$$

где R – потери биомассы на дыхание ($\text{г}\text{см}^{-2}\text{мес}^{-1}$).

GPP рассчитывается по формуле

$$\text{GPP} = ef(T)g(w) \times \text{FPAR} \times \text{PAR}.$$

В этом уравнении функции f и g отражают зависимость продукции фотосинтеза от температуры и содержания воды в почве. Эти функции обычно определяются для каждой территории эмпирически. В целом, для этих функций можно принять следующие аппроксимации:

$$\text{GPP}(T, W) = 4,25 \cdot 10^{-4} T^3 - 8,76 T^3 - 1,99 T^2 W + 4,29 T \cdot W^2 + 2,29 T^2 + 19,05 W^2 - 8,79 T \cdot W + 4,56 T - 14,16 W + 4,18;$$

$$H(T, W) = -5,16 T^3 - 161,4 W^3 - 9,41 T^2 W + 6,79 T \cdot W^2 - 9,47 T^2 + 199,51 W^2 - 4,37 T \cdot W + 7,47 T - 44,17 W + 4,93;$$

$$B(T, W) = -9,02 T^3 + 225,79 W^3 + 1,11 T^2 W - 29,39 T \cdot W^2 - 5,87 T^2 - 511,72 W^2 + 41,29 T \cdot W - 11,37 T + 356,97 W - 62,94,$$

где B – накопленная биомасса; H – накопленный гумус.

Для травяной экосистемы можно применить зависимости [12]:

$$f(T) = \frac{(T_{\min} - T)(T_{\max} - T)}{(T_{\min} - T)(T_{\max} - T) - (T_{opt} - T)^2};$$

$$g(w) = \frac{1,64r_{s\min} + r_m + 1,39r_a}{1,64r_{sc} + r_m + 1,39r_a},$$

где $r_{s\min}$, r_{sc} , r_m и r_a – соответственно минимальное и текущее устьичное сопротивление в пологе, мезофильное и пограничное сопротивления переносу влаги в пологе

$$r_{sc} = r_{s\min} [1 + (\phi_1 / \phi_{1/2})^n],$$

$\phi_1 = b \cdot C_s / w$, b , n – поправочные (адаптационные) коэффициенты; $\phi_{1/2}$ – водный потенциал листа при 50 % закрытии устьичных проходов.

Использование указанных характеристик растительного покрова, определяемых спутниками средствами, позволяет предложить следующую схему блока гибкой информационно-моделирующей системы (ГИМС), отвечающего за расчет и картирование NPP. Структурно-функциональная и информационная схема такого блока представлена на рис. 6.

Синтез ГИМС

Наполнение АБПХР данными возможно при его привязке как подсистемы информационно-моделирующей системы, ориентированной на регулярный мониторинг земных покровов в адаптивном режиме коррекции режимов сбора данных. Разработка ГИМС с функциями автоматического контроля состояния биометрических показателей растительного покрова на данной территории возможна при использовании технологии, которая дает способ синтеза систем мониторинга с адаптивными возможностями использования накопленной в биоценологии априорной информации, данных моделирования и дистанционных измерений. Конструктивная особенность ГИМС-технологии базируется на согласовании набора моделей продуктивности, ориентированных на восприятие данных спутниковых измерений характеристик растительных

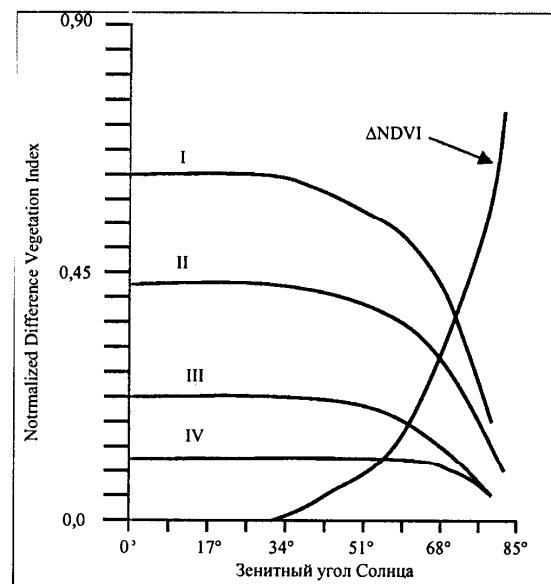


Рис. 5. Рассчитанные значения NDVI по надирным наблюдениям с помощью радиометра высокого разрешения AVHRR для различных типов покровов. Обозначения типов покровов: I – высокопродуктивная растительность; II – растительный покров со средним уровнем фотосинтеза; III – низкопродуктивная растительность; IV – голая почва.

покровов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Синтез ГИМС потребует выполнения следующего комплекса работ:

- 1) предметная инвентаризация баз данных и знаний о характеристиках и закономерностях функционирования растительного покрова на данной территории;
- 2) классификация моделей, развитых в биоценологии, по классам их пространственно-временной ориентации;

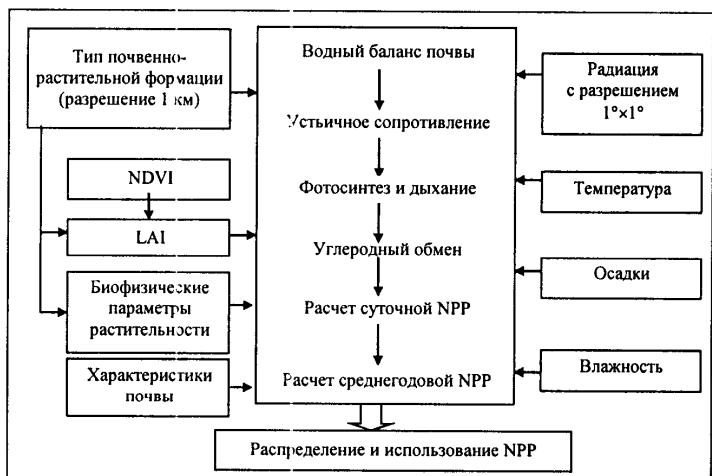


Рис. 6. Основные элементы модельного блока ГИМС для расчета NPP

3) проведение имитационных исследований для выбора иерархической структуры базы данных ГИМС с обеспечением информационного интерфейса с набором моделей;

4) определение информативного перечня оптических сенсоров спутникового базирования;

5) оценка вклада и необходимости использования сенсоров других диапазонов.

Тематическая и предметная ориентация компьютерных средств, необходимых для реализации всех функций ГИМС определяется структурой ее блоков. Программное обеспечение для ГИС в настоящее время широко распространено. Ряды компьютерных моделей функционирования элементов окружающей среды охватывают широкий спектр пространственных шкал – от региональных до глобальных. Особое место в программном обеспечении ГИМС занимают реализации алгоритмов обработки и интерпретации результатов измерений в режиме мониторинга. В составе ГИМС имеются эффективные алгоритмы обработки данных мониторинга, которые были апробированы на многочисленных задачах диагностики элементов окружающей среды с применением дистанционных методов сбора данных. Эти алгоритмы позволяют осуществлять восстановление данных и их интерпретацию в условиях, когда их географическая привязка характеризуется наличием зон неопределенности. В частности, метод гармонических функций позволяет восстанавливать радиоактивность температуру внутри замкнутого контура только по измерениям на его границе. Метод дифференциальной аппроксимации дает конструктивную процедуру восстановления данных по отрывочным во времени и фрагментарным в пространстве измерениям [13].

Синтез ГИМС с функциями контроля растительного покрова требует выполнения этапов теоретических и экспериментальных исследований, перечисленных в таблице.

Заключение

Создание ГИМС с функциями оперативной диагностики лесных экосистем обеспечит получение данных о биометрических и продукционных характеристиках лесов территории России и позволит практически в реальном режиме времени рассчитывать потоки поглощаемого из атмосферы CO₂. Решение возникающих здесь задач возможно в рамках целевой национальной программы с привлечением организаций Российской академии наук и отраслевых институтов, в которых уже имеются разработанные элементы ГИМС.

Ясно, что методы локальной диагностики лесных экосистем, применяемые отдельными организациями и ведомствами, не могут дать комплексную оценку их состояния особенно в случае, когда этот элемент окружающей среды занимает обширные пространства. Любые технические средства сбора данных об окружающей среде позволяют получать лишь отрывочную во времени и фрагментарную по пространству информацию. В частности, СВЧ – радиофизические системы дистанционного зондирования, широко используемые при оснащении летающих лабораторий и природно-ресурсных спутников, поставляют ряды данных, которые географически привязываются к трассам полета. Восстановление информации в межтрассовом пространстве возможно лишь

с помощью методов пространственно-временной интерполяции, которые в структуре ГИМС реализуются соответствующими блоками.

С точки зрения решения комплексной задачи диагностики лесов ГИМС объединит такие функции, как сбор данных с помощью дистанционных и контактных методов, их анализ и накопление с последующей тематической обработкой. Такая система способна обеспечивать систематическое наблюдение и оценку состояния лесов, предопределять прогнозную диагностику изменений их элементов под влиянием хозяйственной деятельности и при необходимости анализировать развитие процессов в окружающей среде при реализации сценариев антропогенного характера с выдачей предупреждений о нежелательных изменениях характеристик природных подсистем. Реализация таких функций мониторинга окружающей среды возможна при использовании методов имитационного моделирования, обеспечивающих синтез моделей эволюции лесных экосистем.

Развитие моделей биогеохимических, биоценотических, гидрофизических, климатических и социально-экономических процессов в окружающей среде, обеспечивающих синтез образов ее подсистем, неизбежно требует формирования систем автоматизации обработки данных мониторинга и создания соответствующих баз данных. Как показали многочисленные исследования в этом направлении, существуют сбалансированные критерии отбора информации, учитывающие иерархию причинно-следственных связей в биосфере, которые включают в себя согласование допусков и глубины пространственной дискретизации при описании атмосферы, наземных экосистем и гидросфера, степень их элементной детализации. Поэтому создание ГИМС для изучения лесных экосистем возможно лишь в рамках комплексного рассмотрения их взаимосвязи с другими подсистемами окружающей среды.

Применение математического моделирования в системах спутникового мониторинга, как показывают многочисленные исследования, может дать практический эффект только при создании единой сети данных, сопряженной с моделью системы «природа–общество». Концептуальная схема аддитивного режима таким образом организованного мониторинга диктует принятие такой архитектуры системы мониторинга, которая бы объединяла знания различных наук в единую систему и создавала возможность гибкого управления этими знаниями. Это возможно по пути объединения ГИС-технологии, методов экспертных систем и имитационного моделирования.

ГИС обеспечивает обработку географических данных, связь с базами данных и символическое представление топологии изучаемых территорий. Расширение ГИС до ГИМС=ГИС+Модель изменяет некоторые функции пользовательского интерфейса компьютерных картографических систем, включая прогнозные оценки на основе априорных сценариев изменения условий функционирования подсистем окружающей среды. При этом имеющиеся измерения параметров подсистем могут использоваться как для оценки коэффициентов моделей, так и непосредственно для прогнозной оценки по методике эволюционной технологии [13].

Теоретические и экспериментальные исследования, реализация которых обеспечит решение задачи синтеза ГИМС с функциями контроля растительных покровов

Этап	Решаемые задачи
1. Формирование базы данных ГИМС	1.1. Сбор и обобщение картографических данных о пространственной структуре почвенно-растительных формаций с указанием их типов. 1.2. Определение биометрических характеристик земных покровов. 1.3. Определение структуры ландшафтов с указанием их морфологии и других характеристик, необходимых для выделения фаций. 1.4. Задание картографической схемы структуры речных бассейнов и изолированных водоемов на территории.
2. Разработка типовой биометрической модели	2.1. Анализ существующих моделей функционирования растительных формаций и выбор наиболее информативных для условий изучаемого региона. 2.2. Разработка моделей фотосинтеза как элемента модели регионального баланса биомассы растительного покрова. 2.3. Выбор алгоритма согласования данных дистанционного мониторинга с построенными моделями при определении параметров моделей и на этапах оценки рассогласований между данными измерений и результатами моделирования.
3. Разработка алгоритмов согласования наземных, самолетных и спутниковых измерений характеристик экосистем	3.1. Выбор размеров пространственных пикселей, обеспечивающих необходимую точность оценки состояния биологических процессов и экосистем. 3.2. Разработка мнемонического языка согласования базы данных с блоками модели геоэкосистемы выбранной территории. 3.3. Разработка алгоритма восстановления пространственного образа геоэкосистемы территории по эпизодическим во времени и отрывочным по пространству данным дистанционных и наземных измерений. 3.4. Разработка метода преодоления нестационарности получаемых при дистанционных измерениях данных о системах региона.
4. Разработка алгоритма принятия управленческих решений при выборе стратегии измерений или модернизации типовой модели региона	4.1. Выбор шкалы и критерия оценки невязки между данными эксперимента и результатами моделирования. 4.2. Определение процедуры принятия решения о коррекции режима мониторинга или изменении параметров биометрической модели, обеспечивающей реализацию последовательной смены измерений и прогнозирования. 4.3. Подготовка документации, регламентирующей действия оператора ГИМС в случае получения от системы сигнала о возможном формировании чрезвычайной ситуации (лесной пожар, засуха, заболачивание и т.п.).
5. Определение форм представления отчетов о результатах функционирования ГИМС	5.1. Выбор форм отчетности, обеспечивающих потребности служб для принятия решения о проведении мероприятий по управлению экосистемой. 5.2. Компьютерная реализация выбранных форм отчетности с обеспечением информационной потребности различных служб.
6. Формулировка синоптических сценариев	6.1. Разработка положения о взаимодействии оператора ГИМС с национальной и региональной метеорологическими службами. 6.2. Создание типовых синоптических сценариев для отдельных регионов и на основе изучения имеющихся глобальных и европейских сценариев изменения климата как базовых элементов ГИМС, используемых в режиме «по умолчанию». 6.3. Анализ климатических трендов на территории региона и разработка прогнозов изменения направленности этих трендов. 6.4. Построение эволюционной модели синоптического тренда, обеспечивающей постоянное опережение оценки синоптической обстановки в регионе по полученным метеорологическим данным.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-01-90303 Вьет_а).

Контактный телефон: (496) 565-25-58

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев А.С. О судьбе русского леса// ЭКОС. 2005. № 3.
2. Филипчук А.Н. Таксация леса. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008.
3. De Boer Y. Foreword to investment and financial flows: to address climate change. UNFCCC, Bonn (Germany), 2007.
4. Бондур В.Г., Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Проблемы мониторинга и предсказания природных катастроф // Исследование Земли из космоса. 2005. № 1.
5. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. М.: Физматлит, 2004.
6. Тарко А.М. Математическое моделирование антропогенных изменений глобальных биосферных процессов. М.: Физматлит, 2004.
7. Бурков В.Д., Крапивин В.Ф. Экоинформатика: алгоритмы, методы и технологии. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2009.
8. Schwalm C.R., Ek A.R. Developing the next generation of forest ecosystem models. In: McRoberts R.E., Reams G.A., Van Deusen P.C., and Moser J.W. (eds.). Proceedings of the Third Annual Forest Inventory and Analysis Symposium; Gen. Tech. Rep. NC-230. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station, 2002.

9. Ganguly S., Schull M.A., Samanta A. et al. Generating vegetation leaf area index earth system data record from multiple sensors. Part 1: Theory. Remote Sensing of Environment, Vol. 112. Issue 12, 15 December 2008.

10. Yang W., Huang D., Tan B. et al Analysis of leaf area index and fraction of PAR absorbed by vegetation products from the terra MODIS sensor: 2000–2005//IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006. Vol. 44. № 7.

11. LAI-2000. Plant canopy analyzer. Operating manual. LI-COR Inc., Nebraska (USA), 1992.

12. Sellers P.J., Randall D.A., Collatz G.J. et al A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 1: Model formulation // Journal of Climate. 1996. Vol. 9. № 4.

13. Савиных В.П., Крапивин В.Ф., Потапов И.И. Информационные технологии в системах экологического мониторинга. М.: Геодезкартиздат, 2007.

BIBLIOGRAPHY

1. Isaev A.S. About destiny of Russian wood// ЭКОС. 2005. № 3.
2. Filipchuk A.N. Valuation of a wood. M.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008.
3. De Boer Y. Foreword to investment and financial flows: to address climate change. UNFCCC, Bonn (Germany), 2007.
4. Bondur V.G., Kondrat'ev K.J., Krapivin V.F., Savinov V.P. Problem of monitoring and a prediction of natural accidents // Research of the Earth from space. 2005. № 1.