На правах рукописи

Рыжова Елена Владимировна

Комплекс методик предпроектного обоснования применения космических средств наблюдения для мониторинга состояния лесов

Специальности:
05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов
05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва
2006

Работа выполнена в научно-исследовательском институте космических систем – филиале Федерального государственного унитарного предприятия «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева»

Научные руководители:
доктор технических наук Перминов Анатолий Николаевич
кандидат технических наук Клюшников Валерий Юрьевич

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук Боярчук Кирилл Александрович
кандидат технических наук Зубрев Валентин Николаевич

Ведущая организация:
Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральныйнаучно-исследовательский институт машиностроения»

Защита состоится «23» ноября 2006 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета ДС 403.003.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева» по адресу: 141090, Московская обл., г. Юбилейный, ул. М.К. Тихонравова, 27, НИИ космических систем

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИ космических систем

Автореферат разослан «5» октября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор Чаплинский В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Космические аппараты (КА) ДЗЗ представляют основной источник данных о состоянии окружающей среды. Космические технологии являются эффективным средством глобального, постоянного и надежного мониторинга окружающей среды. Они дают оперативную информацию, используемую в различных социально-экономических сферах: картографировании, решении задач ЧС, гидрологии, лесного и сельского хозяйства, рыбного хозяйства, экологического мониторинга, земельного кадастра.

Резкий рост уровня антропогенного воздействия на окружающую среду в сочетании с низкой эффективностью и разобщенностью природоохранных мероприятий привел за последние десятилетия к значительному ухудшению экологической обстановки в различных регионах Российской Федерации. Наиболее уязвимыми оказались промышленно-развитые районы с высокой концентрацией промышленных производств топливно-энергетического, химического, металлургического и др. профилей, приведших к превышению уровней допустимой экологической нагрузки на природную среду, возникновению потенциально опасных чрезвычайных ситуаций. Компенсировать перечисленные последствия позволяют регуляторные способности биосферы, в основном, растительности.

Органы управления лесным хозяйством России, особенно федерального и регионального уровней, испытывают значительные трудности в оперативном управлении лесами, т. к. при подготовке и обосновании принимаемых решений не обладают в настоящее время достоверной, оперативной и систематизированной информацией о произошедших изменениях в состоянии лесного фонда. Необходим переход на качественно новый уровень получения информации.

Основной задачей космического мониторинга лесов является экологическая и экономическая оценка последствий хозяйственной деятельности человека. Задача должна состоять в отслеживании различного рода достаточно тонких изменений, способных указать на ухудшение экологического состояния леса. А для этого нужны долговременные регулярные наблюдения за лесом. Перспективным источником данных долговременных, полных и регулярных наблюдений за экологическим состоянием лесов в глобальном или региональном масштабе способны стать космические средства. Однако, на наш взгляд, эффективное использование космических средств наблюдения для мониторинга лесов возможно лишь на основе системного решения поставленной задачи, заключающегося во взаимной увязке биологических особенностей лесной растительности, методов сбора и обработки дистанционной информации и потребных технических характеристик космических средств наблюдения. Данная работа основана на новом подходе к оценке экологического состояния лесов с использованием временных рядов, получаемых космическими

средствами наблюдения. Однако его реализация в данном конкретном случае требует наличия:

- бортовой измерительной аппаратуры КА, обладающей соответствующими характеристиками;
- новых информационных технологий для определения функциональных зависимостей между спектральными характеристиками лесной растительности и их биопродуктивностью на основе космической информации.

Эффективное использование космических средств наблюдения возможно лишь на основе системного решения проблемы.

В России предприятиями и организациями Роскосмоса, Академии Наук, Минобороны накоплен громадный массив данных дистанционного зондирования, полученных в течение почти четырех десятилетий. Казалось бы, для целей экологического мониторинга, да и для многих других областей, такая информация не имеет цены. На основе длительных наблюдений можно выделить тренды характеристик различных природных объектов и явлений, выявить их корреляцию (или отсутствие таковой) с техногенной деятельностью. Причем, насколько нам известно, никаким другим способом этого сделать нельзя.

И, тем не менее, данные дистанционного зондирования (ДДЗ) в России, в частности архивные, не достаточно востребованы. Во всяком случае затраты на их получение не всегда окупаются эффектом от их использования. На наш взгляд, такая ситуация сложилась из-за того, что потенциальный потребитель ДДЗ не в полной мере представляет возможности КА наблюдения, а разработчикам аппаратуры и КА дистанционного зондирования не всегда ясно, что нужно конкретному потребителю.

«Методики потребителя и разработчика» тесно взаимосвязаны и представляют собой единый комплекс методик обоснования применения космических средств наблюдения в целях мониторинга экологического состояния лесов.

Дистанционно с использованием авиационных и космических средств ДЗЗ состояние лесов определяют на основе результатов измерения их оптических характеристик. За последние 30-40 лет в отечественном лесоведении изучению спектральной отражательной способности древесной растительности были посвящены исследования Б.Ф. Виноградова (1984), А.С. Исаева и Ф.И. Плешикова (1987), Н.Н. Выгодской (1987), В.М. Жирина (1993) и др. однако в данных работах динамика изменения оптических характеристик лесной растительности учитывается недостаточно. В данных работах определяются линейные тренды характеристик, а между тем, для растений характерно периодическое изменение их характеристик. Сложность в определении этих характеристик с использованием космических средств обусловлена рядом ограничений, а именно:

- значительной вариацией спектральных характеристик объекта наблюдения в зависимости от вегетационного периода, климатических условий, рельефа местности;
- смешенным произрастанием лесной растительности;
- зависимостью качества данных об объекте наблюдения от метеорологической обстановки.

Основная доля поступающей от космических средств информации лежит в видимом диапазоне длин волн или в ближнем ИК-диапазоне. В этом диапазоне функционируют целый ряд зарубежных спутников наблюдения, таких как «SPOT», «LANDSAT» и др. Количество отечественных КА наблюдения, функционирующих на орбитах, ограничено. При этом используемая спектрозональная бортовая измерительная аппаратура не в полной мере удовлетворяет решению целевой задачи. В нашей стране ДЗЗ осуществлялось с помощью КА оптико-электронного наблюдения типа «Ресурс-О1» и фотографического наблюдения «Ресурс-Ф». Опыт эксплуатации данных КА показал ряд их недостатков, особенно с появлением новых задач, таких как экологический мониторинг, контроль чрезвычайных ситуаций и др. В России имеется опыт использования информации космических средств наблюдения только для обнаружения техногенных и некоторых видов природных объектов для которых характерны стабильные спектральные характеристики.

Методические вопросы анализа периодических критериев спектральных характеристик при мониторинге состояния лесов не проработаны.

Следует также учитывать очевидные на данном этапе экономические ограничения по созданию специализированной космической системы мониторинга состояния лесов, строительства отдельных пунктов приема космической информации и т.д.

Все вышеизложенное свидетельствует об актуальности постановки задачи разработки комплекса методик предпроектного обоснования применения космических средств наблюдения для мониторинга состояния лесов.

Целью данной работы является повышение информативности и достоверности оценки состояния лесов на основе применения космических средств наблюдения и учета динамики развития растительного покрова.

Для достижения поставленной цели в диссертации решается научная задача разработки комплекса методик предпроектного обоснования применения космических средств наблюдения для мониторинга состояния лесов. Решение данной задачи включает:

- обоснование метода интерпретации многолетних данных космического мониторинга состояния лесов;
- разработку комплекса методик получения и интерпретации многолетних данных космического мониторинга состояния лесов;

- разработку комплекса методик по предпроектному обоснованию требований к характеристикам КА ДЗЗ, реализующим предложенный способ получения и интерпретации многолетних данных космического мониторинга состояния лесов;
- апробацию разработанного методического аппарата на практическом примере.

Объектом исследования являются космические системы наблюдения и лесные экосистемы.

Предметом исследования является применение средств космического наблюдения для мониторинга состояния лесов.

Научно-методической базой диссертационного исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых в области разработки перспективных космических средств наблюдения лесных экосистем, а также наземных средств лесной таксации, контроля состояния лесов и дендроиндикации.

В диссертации в качестве инструмента исследования использовались современные методы системного анализа и математического моделирования, анализа временных рядов и исследования операций.

Основные положения, выносимые на защиту:
- комплекс методик предпроектного обоснования применения космических средств наблюдения для мониторинга состояния лесов, включающий:
- методику оценки биологической продуктивности лесов на основе обработки дистанционной космической информации;
- методику классификации экологического состояния леса;
- методику расчета периодичности наблюдений;
- методику выбора типа КА ДЗЗ и аппаратуры наблюдения для получения данных космического мониторинга состояния лесов;
- модель лесной экосистемы;
- предложения по реализации метода космического мониторинга состояния лесов.

Научная новизна предлагаемых методик состоит в следующем:
- биопродуктивность предложено оценивать дистанционно, при помощи перспективных КА наблюдения, оснащенных спектрозональной и радиолокационной аппаратурой наблюдения;
- разработанная методика классификации экологического состояния леса исходит не только из наблюдаемых признаков состояния леса, но и из тенденций их изменения, сигнализирующих об экологическом неблагополучии в принципе;
- в методике расчета периодичности наблюдений при мониторинге состояния лесов, учитывается динамика показателя биопродуктивности;

- выбор орбитального построения, типа и характеристик бортового комплекса КА наблюдения предложено осуществлять, исходя из требований получения максимального количества информации о динамике биопродуктивности наблюдаемых лесов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и сделанных выводов подтверждаются положительными результатами эксперимента по мониторинговым исследованиям динамики развития лесного растительного покрова на модельном примере, а также – корректным использованием в работе апробированных методов системного анализа и математического моделирования.

Практическая ценность результатов работы состоит в том, что они позволяют:

- повысить достоверность оценки состояния лесов для уменьшения эколого-экономического и социального ущерба от воздействий природного и техногенного характера;
- прогнозировать по данным космических наблюдений развитие кризисной экологической ситуации;
- обосновать своевременные природоохранные мероприятия и решать с помощью космических средств наблюдения практические задачи лесного мониторинга в системе управления лесным хозяйством России на федеральном и региональном уровнях.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на научных чтениях: IV чтениях им. М.К. Тихонравова (2002 г.), XXXIX и XL научных чтениях памяти К.Э. Циолковского (2004 и 2005 г.г.), 6-ой международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос» (2005 г.), XXIX академических чтениях по космонавтике (2005 г.).

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в трех статьях в научно-технических журналах [3, 5, 9], в шести статьях в Трудах научно-технических конференций [1,2 – 4, 6-8] и в трех научно-технических отчетах [10-12].

Основные результаты исследования были использованы при проведении НИОКР НИИ КС, ЦНИИмаш, 2НИЦ 4 ЦНИИ и 4 ЦНИИ Минобороны, в комплекте оборудования для экологической разведки загрязненных территорий на базе самолета *Ан-30* (ОКР «Красногорец»).

Структура и объем работы

Работа включает в себя: введение, три главы основного текста с выводами по каждой из них, заключение, список использованной литературы и приложения. Объем текста 160 стр., включает 29 рисунков, 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность постановки и проведения исследований по обоснованию применения космической системы для мониторинга состояния лесов, новизна и практическая значимость диссертационной работы, формулируется цель и задача исследования, дается информация по апробации работы и структуре диссертации.

В первой главе проведен анализ возможностей существующих и перспективных космических средств наблюдения по решению задач мониторинга состояния лесов. Показано, что космическая информация может быть использована при решении широкого круга задач мониторинга лесов, а именно:

- охрана лесов от пожаров;
- контроль санитарно-лесопатологического состояния лесов;
- контроль территорий, загрязненных радионуклидами;
- контроль лесопользования и лесовосстановления;
- оценка состояния лесных экосистем и лесного покрова.

Проведен анализ публикаций с целью определения понятия состояния лесов и сравнения различных методов оценки их состояния. На основании проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

- на сегодняшний день отсутствует методология классификации состояния лесов;
- существующие методы оценки состояния лесов не удовлетворяют потребностям пользователей данной информацией ни по качественным показателям, ни по ее обзорности (таб. 1).

В настоящее время экологи и биологи пришли к выводу, что наиболее информативным показателем, указывающим на экологическое состояние лесов, является их биопродуктивность – динамика изменения биомассы леса в течение длительного времени. В связи с этим в данной работе исследуется именно этот показатель.

Проведен анализ показателей информативности и достоверности интерпретации данных космического мониторинга состояния лесов.

Под показателем информативности в данной работе понимаем увеличение количества информации, получаемой об объекте наблюдения. Показатель достоверности представляет собой вероятность достоверной интерпретации изображения заданного участка леса P_0.

В главе сформулирована научная задача и выработаны основные направления проведения исследований.

Таблица 1

Сравнительный анализ различных методов оценки состояния лесов

Метод обследования	Преимущества	Недостатки
Наземная таксация	Возможность детального исследования небольших участков леса.	Около 20% лесного фонда из-за расположения в труднодоступных районах никогда не подвергались наземной таксации; о 63,3% территории лесного фонда имеются данные давностью более 10 лет. Периодичность проведения работ 5-10 лет (не применимо для мониторинга с целью оценки экологического состояния леса).
Аэрофотосъемка	Объем работ, выполняемых одним исполнителем, возрастает в 1.5 – 2 раза, стоимость работ снижается на 15 – 20% (по сравнению с наземной таксацией) Самолет может летать ниже облаков или повторить полет на следующий день. Можно получать изображения с разрешением до нескольких сантиметров в зависимости от высоты полета.	Высокая стоимость аренды летательных средств, как следствие, низкая периодичность наблюдения. Данные обычно записываются на пленку. Требуется сканирование и коррекция по направлению полета. Пленочные камеры обычно получают раздельно цветные и инфракрасные изображения. Трудоемкость и вследствие этого большие затраты при обработке результатов аэрофотосъемки в камеральных условиях.
Космический мони-	Большая обзорность космических снимков. Например, с высоты 250 км в 50 раз, по сравнению с аэрофотосъем-	Облачность является большой проблемой. Период повторного наблю-

Метод обследования	Преимущества	Недостатки
торинг	кой, выполняемой с высоты 5 км, увеличивается захват территории по одной стороне кадра и в 2500 раз по площади. Один космический снимок в данном случае перекрывает площадь 10000 аэроснимков. Данные фиксируются в цифровом виде, поэтому не нужно обрабатывать пленку. Одновременно получают изображения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Возможность осуществления высокой периодичности наблюдения. Высокая оперативность поступления информации. Возможность получения информации для объектов недоступных к изучению другими средствами. Быстрота и удобство обработки цифровых данных в камеральных условиях. Экономичность – стоимость снимка 1км^2 с высоким разрешением – 10$.	дения от 3 дней и более. В настоящее время самым лучшим считается пространственное разрешение 61 см. Неразвитая архивная база космических изображений.

Глава 1 завершается методической схемой решения задачи исследований.

Во второй главе разрабатывается комплекс методик предпроектного обоснования применения космических средств наблюдения для мониторинга состояния лесов. В данной работе сделана попытка объединения интересов и потребителя ДДЗ, и разработчика КА ДЗЗ. Предлагаемый комплекс методик условно можно разделить на две части:

- «методики потребителя» ДДЗ, описывающие порядок получения и интерпретации многолетних данных космического мониторинга состояния лесов;
- «методики разработчика» аппаратуры и КА ДЗЗ, непосредственно предназначенные для обоснования требований к характеристикам КА ДЗЗ.

Здесь требования к характеристикам аппаратуры и КА ДЗЗ непосредственно вытекают из предназначения и порядка использования (тематической обработки) ДДЗ. В то же время «методики потребителя» основываются на новом предлагаемом способе получения и интерпретации данных космического мониторинга состояния лесов, учитывающем динамику жизненного цикла

лесных экосистем и позволяющем полнее использовать возможности КА ДЗЗ. По этой причине вопросы обработки и интерпретации ДДЗ в контексте обоснования конкретного целевого применения КА наблюдения потребовали подробного рассмотрения.

В данной работе рассматривается задача экологического мониторинга состояния лесов, и потребитель предъявляет определенные требования к космической информации, обеспечивающие ее пригодность для решения данной задачи. К числу этих требований относятся: рабочие диапазоны частот аппаратуры наблюдения, пространственное и спектральное разрешение и периодичность наблюдения (таб. 2).

Таблица 2

Обобщенные требования к космической информации для оценки состояния лесов

Требования	Условия	
Параметры орбиты	Солнечно-синхронная орбита, i ~ 90°	
Условия съемки	Высота Солнца не менее 20-25°	
Целевая аппаратура: Тип Рабочие диапазоны Разрешение, м	 Спектрозональная 0,5 – 0,6 0,6-0,7мкм не хуже 10	 Радиолокационная L – диапазон не хуже 10
Периодичность наблюдения	3 недели	2 месяца

В разработанной методике оценки биопродуктивности леса по дистанционной информации предлагается использовать комплексирование космических спектрозональных и радиолокационных изображений. Лес имеет многоярусную структуру, и если при определении продуктивности сельхозугодий было достаточно измерить только спектральные характеристики растительности, то в случае с лесом использование этого метода снижает точность и достоверность результата. Комплексирование космических изображений дает возможность учесть структуру леса и имеет следующие преимущества:

- контрастирование селективных признаков за счет синтезирования двух, физически различающихся, изображений;
- повышение точности и достоверности измерений за счет использования нескольких независимых признаков растительных образований: индекса жизненности и пространственной структуры;
- статистическая устойчивость результатов за счет обработки больших объемов информации.

Биопродуктивность листьев (хвои) рассчитывается по простому зональному отношению $r\lambda = 550/ r\lambda = 670$, так как это отношение обладает большей информативностью для решения поставленной задачи. При радиолокационном зондировании уровень отраженного эхо-сигнала зависит от удельной эффективной площади рассеивания (Syд) подстилающей поверхности. В L-

диапазоне основной вклад в Syд вносят элементы, определяющие структуру древостоя, находящиеся под пологом: высота, толщина, количество стволов, густота веток, т.е. то, что в перпендикулярном лучу зондирования сечении формирует отражающую поверхность. Таким образом, из данной методики следуют требования к типу аппаратуры наблюдения и ее рабочим диапазонам.

В данной работе разработана обобщенная модель лесной экосистемы, позволяющая рассчитывать, оценивать и прогнозировать биопродуктивность отдельно взятого гэпа. Ее отличительной особенностью является то, что она позволяет учесть влияние эндогенных и экзогенных факторов на состояние лесной экосистемы (рис. 1).

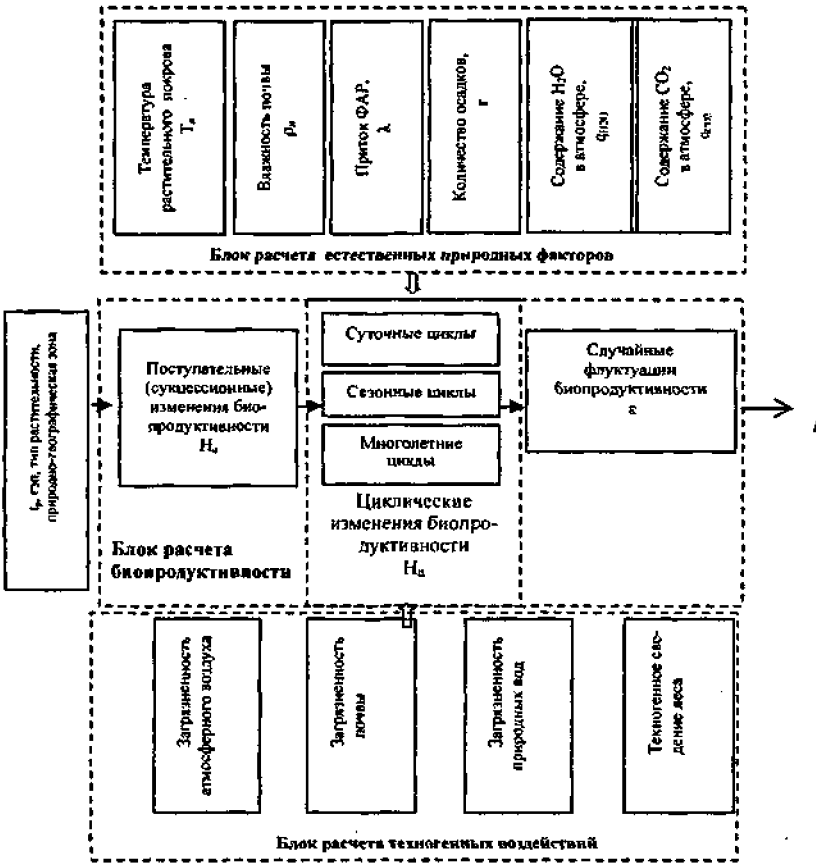


Рис. 1 Обобщенная модель лесной экосистемы

С использованием результатов дистанционного космического мониторинга леса строится временной ряд изменения биопродуктивности $H(t_i)$, $t_i \in [t_0, t_k]$. Его анализ проводится на основе описанных в модели закономерностей развития лесной экосистемы. Во временном ряде значений биопродуктивности $H(t_i)$ выделяют три компоненты:

$$H(t_i) = H_C(t_i) + H_Ц(t_i) + \varepsilon, \qquad (1)$$

где:

$H_C(t_i)$ – детерминированная сукцессионная компонента, представляющая собой некоторую аналитическую функцию, выражающую тенденцию во временном ряде изменения биопродуктивности;

$H_Ц(t_i)$ – компонента, отражающая периодический и квазипериодический характер вариаций биопродуктивности;

ε – случайная компонента биопродуктивности.

Анализ временного ряда динамики биопродуктивности леса заключается в:

- оценке сукцессионной, периодической (квазипериодической) и случайной компонент полученного временного ряда биопродуктивности;
- оценке корреляции (влияния) временного ряда изменения солнечной активности – задающего ряда и временных рядов изменения биопродуктивности леса - эталонного и наблюдаемого.

Анализ различных составляющих временного ряда биопродуктивности леса и анализ корреляций динамики изменения биопродуктивности на наблюдаемых и эталонных участках (гэпах) леса с динамикой солнечной активности положен в основу методики классификации экологического состояния леса. Исходными данными для классификации служат временные ряды изменения биопродуктивности заданного участка леса, экологическое состояние которого необходимо оценить и эталонного, результаты их анализа, данные о динамике лесопокрытия заданного участка леса, а также данные об активности Солнца (динамика изменения числа Вольфа). Корреляция биопродуктивности и степени экологического благополучия леса – перспективный метод определения экологического состояния лесов. Экологическое состояние заданного участка леса оценивают по шкале «норма», «нарушенное состояние», «критическое состояние». Алгоритм классификации представляет собой логико-математическую процедуру, в результате применения которой получают множество классификационных признаков. Окончательная классификация экологического состояния леса производится по одновременному совпадению более чем одного частного признака классификации (рис. 2).

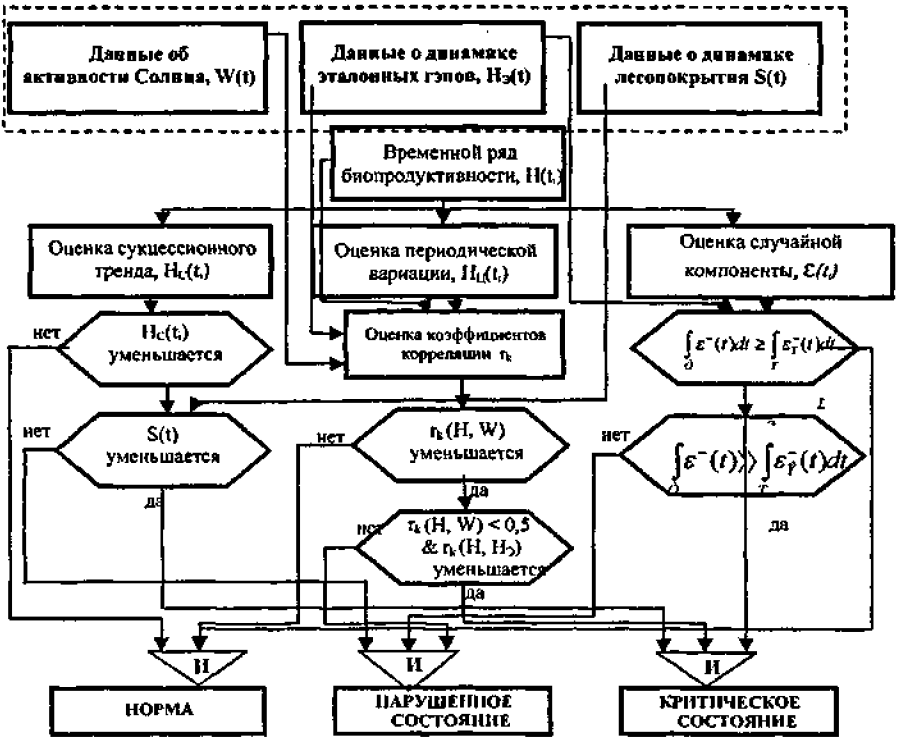


Рис. 2. Методика классификации экологического состояния лесов

Важным моментом при организации мониторинга является задание периодичности наблюдения. В данной работе периодичность наблюдений при мониторинге состояния лесов принимается равной минимальному интервалу времени, через который установленная на КА ДЗЗ аппаратура позволяет зафиксировать изменение биопродуктивности лесной растительности. Очевидно, что периодичность будет различна, во-первых, для спектрозональной и радиолокационной аппаратуры наблюдений (т.е., соответственно, для листьев и древесины), а, во-вторых, - для различных климатических поясов.

Оценка периодичности спектрозональных наблюдений

Биомасса зеленой листвы определяется на основе спектрозональных наблюдений по тем или иным преобразованиям спектральных яркостей, например, - по зональному отношению яркостей спектрозонального изображения леса в зеленой и красной частях спектра: $r_{\lambda=550} / r_{\lambda=670}$. Для непосредственного определения биомассы строят тарировочные графики $M = f(r_{\lambda=550} / r_{\lambda=670})$. От-

носительная точность определения биомассы $\Delta M_{аппар}$ в этом случае будет зависеть в основном от спектрального разрешения аппаратуры $\delta_{сз}$:

$$\Delta M_{аппар} = k_{бас} \cdot \delta_{сз}, \quad (2)$$

где $k_{бас}$ – коэффициент пропорциональности, связывающий методическую точность аппаратурных космических наблюдений (определения биомассы) и спектральное разрешение аппаратуры наблюдения.

Из практики таксационных исследований известны временные зависимости изменения биомассы различных видов лесной растительности:

$$M_{роста} = g(t). \quad (3)$$

Приравнивая правые части равенства (2) и уравнения (3) для листвы и решая его относительно t, получаем значение минимального периода спектрозональных наблюдений биомассы листвы лесной растительности:

$$k_{бас} \cdot \delta_{сз} = g(t),\ t = \Delta T_{н}^{сз}. \quad (4)$$

Оценка периодичности радиолокационных наблюдений

При радиолокационном зондировании лесной растительности в L-диапазоне основной вклад в удельную эффективную площадь рассеивания, отражающую эхо-сигнал, вносят элементы, определяющие структуру древостоя, находящиеся под пологом: высота, толщина, количество стволов, густота веток. В этом случае относительная погрешность определения биомассы $\Delta M_{аппар}$ будет зависеть в основном от радиометрического разрешения аппаратуры $\delta_{р}$:

$$\Delta Mаппар = kбар \cdot \delta р, \quad (5)$$

где $k_{бар}$ – коэффициент пропорциональности, связывающий методическую точность аппаратурных космических наблюдений (определения биомассы) и радиометрическое разрешение аппаратуры наблюдения.

Приравнивая правые части равенства (3) и уравнения (5) для древесной растительности и решая его относительно t, получаем значение минимального периода радиолокационных наблюдений древесной биомассы лесной растительности:

$$k_{бас} \cdot \delta_{р} = g(t),\ t = \Delta T_{н}^{рл}. \quad (6)$$

Влияние географического положения наблюдаемого лесного массива на потребную периодичность наблюдений

Потребная периодичность наблюдений при мониторинге лесов определяется скоростью роста древесной растительности и листвы (хвои) в наблюдаемом районе. В свою очередь скорость роста лесной растительности зависит, помимо всего прочего, и от времени года (фенофазы). Фенофазы зависят от многих климатических факторов, и длительность их в разные годы может варьировать. В задачу мониторинга должны входить и наблюдения за фенологическим состоянием лесов с целью выбора оптимального времени съемки,

потому что оно существенно влияет на результативность дешифрирования съемочных материалов.

В данной главе представлена методика выбора типа КА ДЗЗ для получения данных космического мониторинга состояния лесов. Выбор КА и его орбитальных параметров осуществляется по «пригодности» из существующих типов КА ДЗЗ. В качестве методического аппарата для сравнения предлагается использовать интерактивную систему поддержки принятия многокритериальных решений в условиях дефицита информации, основанную на методах стохастической квалиметрии (определения стохастического доминирования на основе неполной информации).

Набор частных признаков задан в виде вектора:

$$x_j = (Hor_j, i_j, B_j, R_j, Q_j, L_j, T_j), j=1,...,N, \quad (7)$$

где *Hor* – высота орбиты, км,

i – наклонение орбиты, град.;

B – ширина полосы обзора, км;

R – пространственное разрешение, м;

Q – число спектральных диапазонов спектрозональной аппаратуры наблюдения;

L – длина волны для радиолокационной аппаратуры, см;

T – периодичность наблюдений.

Частные признаки определены на основе достаточности информации о КА ДЗЗ для осуществления выбора.

Процедура выбора КА ДЗЗ состоит из следующих шагов:

1. Определение минимальных, максимальных и номинальных значений элементов вектора x_j: $x_{ij}^{min}, x_{ij}^{max}, x_{ij}^{nom}$, $i=1,..,N, j=1, ..., 6$;

2. Задание ординальной информации о важности элементов вектора признаков ранжирования: $I=\{ C_1 \geq C_2 .... C_1 < C_2 ..., C_3 = C_4, ...\}$;

3. Моделирование на основе метода статистических испытаний дефицита информации о точном значении вектора весовых коэффициентов

$$C = (C_1,..., C_6), \quad (8)$$

$$\tilde{C} = (\tilde{C}_1,...\tilde{C}_6), \ \tilde{C} \in W, W \subset E^m,$$

где $W - (m-1)$ -мерный симплекс; $C_i \leq 1, \sum_{i=1}^{6} C_i = 1$.

4. Вычисление сводного показателя:

$$\tilde{Q}(X) = \sum_{j=1}^{k} \tilde{C} f(\mathbf{X}), \quad (9)$$

где $f_j(\mathbf{X})$ – нормализующие линейные невозрастающие функции от частных показателей x_j:

$$f_j(x_i)=\begin{cases} 1, x_i < x_i^{\min}, \\ \dfrac{x_i^{\max} - x_i}{x_i^{\max} - x_i^{\min}}, x_i^{\min} < x_i < x_i^{\max}, \\ 0, x_i < x_i^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

5. Определение стохастического доминирования i-го сводного показателя ранжирования КА ДЗЗ:

$$\tilde{Q}_i(\mathbf{X}) = M\tilde{Q}_i(\mathbf{X}), i = 1,\ldots,N, \quad (11)$$

где M– символ математического ожидания.

Большим значениям сводного показателя $\tilde{Q}_i(\mathbf{X})$ соответствует более высокий уровень соответствия КА ДЗЗ заданным требованиям для решения поставленной задачи.

Важным моментом в ранжировании КА ДЗЗ по степени соответствия требованиям мониторинга состояния лесов является задание ординальной информации об относительной важности частных признаков ранжирования x_j, j=1,...,6.

Анализ характеристик КА ДЗЗ позволил построить следующий ординальный ряд:

$$I = \{x_5 > x_6 = x_4 > x_3 = x_2 = x_1\}, \quad (12)$$

где x_1 – высота орбиты H;

x_2 – наклонение орбиты i;

x_3 – ширина полосы обзора B;

x_4 – пространственное разрешение R;

x_5 – число спектральных диапазонов Q для спектрозональной аппаратуры наблюдения и длина волны L для радиолокационной аппаратуры наблюдения;

x_6 – периодичность наблюдения;

">","=" – отношения соответственно большего и равного предпочтения.

Ординальный ряд (12) сформирован из следующих соображений. Как следует из анализа способа определения показателя биопродуктивности дистанционными методами достоверность его определения, в первую очередь, зависит от характеристик аппаратуры наблюдения. При этом точность определения биопродуктивности спектрозональной аппаратурой зависит, в первую очередь, от спектрального разрешения аппаратуры, следовательно, - от количества спектральных каналов: с увеличением количества каналов точность

определения той составляющей биопродуктивности, которая определяется приростом массы листвы (хвои), возрастает. Точность определения биопродуктивности (составляющей, зависящей от прироста древесных стволов и ветвей) радиолокационной аппаратурой наблюдения, по аналогии со спектрозональной, определяется радиометрическим разрешением и зависит от используемого диапазона длин волн. Следовательно, в ординальном ряде характеристики аппаратуры наиболее важны, так как именно они определяют возможность ее использования для определения биопродуктивности.

Несколько менее важными являются характеристики периодичности наблюдения и пространственного разрешения. Наблюдения с заданными значениями периодичности гарантируют полноту получения дистанционной информации о динамике биопродуктивности лесов. Наблюдения с периодичностью, рассчитанной с учетом динамики развития лесов, позволят выявить начальные стадии нарушений и принять меры по своевременному их устранению. Пространственное разрешение хуже 10 м существенно снижает и точность, и полноту получаемой информации за счет усреднения значений биопродуктивности на площади, превышающей площадь одного гэпа.

Наконец, орбитальные параметры КА ДЗЗ (высота, наклонение орбиты и ширина полосы обзора), определяющие в основном производительность наблюдений, выполняемых одним КА, еще менее значимы. От высоты орбиты и ширины полосы обзора зависит только лишь наблюдаемая в одном кадре (сцене) площадь. Наклонение орбиты, близкое к 90°, гарантирует наилучшие условия освещенности при наблюдениях. Следовательно, перечисленные выше орбитальные параметры, с точки зрения решения задачи определения биопродуктивности лесов, примерно равнозначимы.

В третьей главе представлены результаты предпроектного обоснования требований к характеристикам КА ДЗЗ и прикладные аспекты космического мониторинга состояния лесов.

Орбитальная группировка КА ДЗЗ будет характеризоваться количеством КА, информация с которых используется для мониторинга состояния заданного участка леса, и параметрами их орбит. Орбитальная структура КА должна обеспечивать выполнение требований по периодичности наблюдения одного и того же участка земной поверхности. На основании методики определения периодичности наблюдений, представленной во второй главе, произведен расчет периодичности наблюдений. Расчет производится с учетом временных зависимостей изменения биопродуктивности для различных пород средней полосы России. Анализ структуры прироста биопродуктивности показывает (рис. 3.), что в формировании органического вещества хвойных пород (за исключением ели) наиболее существенна роль стволов, лиственных пород - ассимиляционных органов (листвы).

Так, в сосновом и сосново-еловом насаждениях стволы создают соответственно 37,6 и 45% прироста, ассимиляционные органы – 29,1 и 23,6%. В общем приросте органической массы на ветви приходится 11,5 и 15,7%, на корни – 21,8 и 15,7%. В еловом насаждении в структурном составе прироста относительно преобладают хвоя (листья) – 36,5%, стволы составляют 34,8%, ветви – 8%, корни – 20,7%. В березовых лесах многолетние части (стволы и корни) имеют подчиненное значение: 5-22% от массы ежегодного прироста.

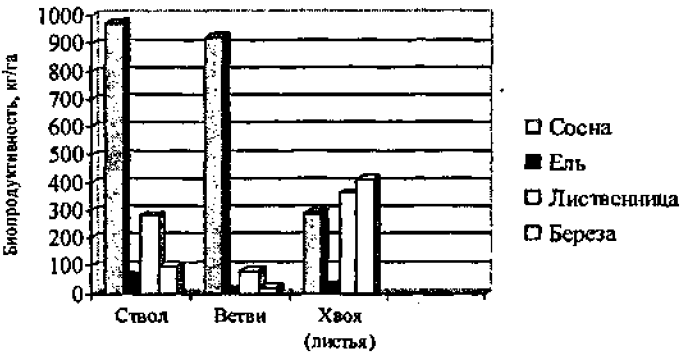


Рис. 3. Структура биопродуктивности основных лесных пород деревьев: в среднем – 63% биомассы стволов и ветвей + 37 % биомассы хвои (листьев)

Отсюда усредненная по различным породам деревьев минимальная биопродуктивность составляет порядка H_{min} = 3754 кг/га в год или H_{min} = 37,54 кг/гэп в год. Из них $H^{ств}_{min}$ = 23,65 кг/гэп приходится на стволы и ветви и $H^{л}_{Нет^{min}}$ =13, 89 кг/гэп – на хвою и листья.

При современном состоянии космического дистанционного зондирования ошибки измерения биомассы лесной растительности (листовых индексов) приводят к ошибкам оценки продуктивности при единичном измерении в десятки процентов. При регулярном проведении измерений и их пространственном и временном суммировании точность определения годовой продуктивности может повыситься до единиц процентов. Примем точность определения составной части биопродуктивности лесных пород деревьев, - биомассы листвы (хвои) на основе спектрозональных наблюдений равной 5 %. Это означает, что $k_{бас}\cdot\delta_{св}$ = 0,05· $H^{л}_{min}$ = 0,05·13, 89 кг/гэп = 0,6945 кг/гэп. Прирост за сутки составляет 0,038кг/гэп, получаем: $t = \Delta T^{св}_{и}$ = 18 сут. Точность радиолокационных измерений биомассы стволов и ветвей лесных деревьев примем равной 15%. Это означает, что $k_{бас}\cdot\delta_{р}$ = 0,15· $H^{ств}_{min}$ = 0,15·23,65 кг/гэп = 3,5475 кг/гэп. Прирост за сутки составляет 0,066кг/гэп, получаем: $t = \Delta T^{рл}_{и}$ = 55 сут.

На рис. 4 и 5 проиллюстрирован принцип графического решения задачи в соответствии с формулами (4) и (6).

Таким образом, потребная периодичность космических наблюдений при мониторинге экологического состояния лесов составляет порядка 3-х недель для спектрозональной съемки и 2-х месяцев – для радиолокационной.

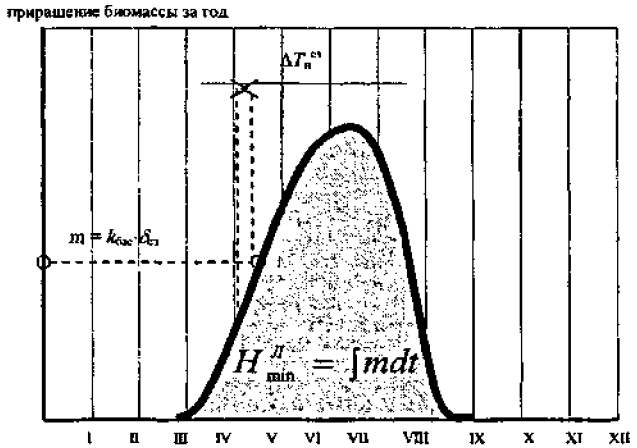


Рис. 4. Иллюстрация принципа графического определения минимальной периодичности спектрозональных космических наблюдений при мониторинге состояния лесов

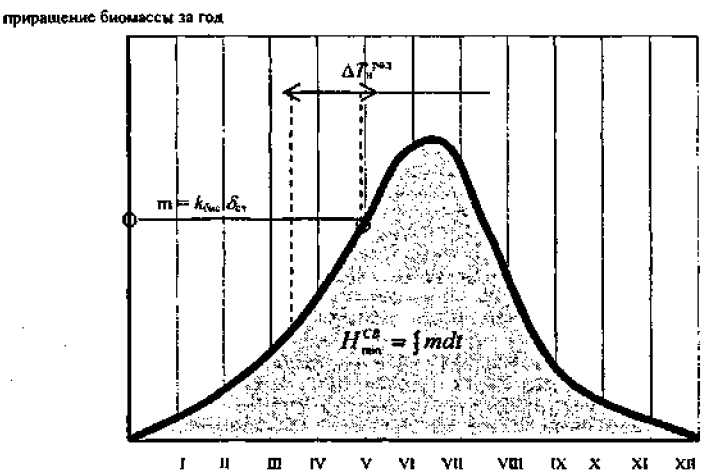


Рис. 5. Иллюстрация принципа графического определения минимальной периодичности радиолокационных космических наблюдений при мониторинге состояния лесов

В качестве примера рассматривалась задача выбора рациональной орбитальной структуры, состоящей из уже функционирующих и разрабатываемых КА ДЗЗ. Данные об орбитальных параметрах и аппаратуре наблюдения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики КА ДЗЗ

№ п/п	КА ДЗЗ	Высота орбиты, H, км	Наклонение, i, град.	Ширина полосы обзора, B, км	Пространств. разрешение, R, м	Число спектр. диапазонов, Q	Длина волны, L, см
КА ДЗЗ с радиолокационной аппаратурой на борту							
1	Radarsat	798	98,6	20-500	3-100		23,5
2	МОНИТОР – Р23	550	96	30-40			23,5
3	ERS - 2	785	98,5	80-125	26…100		3,0
4	КОНДОР-Э	450…900	98	2-500	1…3		23,5
5	«Аркон-2»	550-650	96	450 250	3…30 30		23 70
КА ДЗЗ со спектрозональной аппаратурой на борту							
1	Landsat	705	98,2	185	15…30	4	
2	Spot 5	830	98,7	120	10	4	
3	IRS-P3	817	98,1	142	23,5	2	
4	Ресурс-ДК1	350-610	64,8 и 70,4	28,3	2…3	3	
5	БелКА	510	97,6	20	10	3	
6	Монитор - И	550	97,5	160	20	3	
7	Монитор – Э	550	97,5	160	20…40	3	

Выбор КА ДЗЗ и аппаратуры наблюдения в целях осуществления мониторинга состояния лесов осуществлен на основе предложенных частных признаков (глава 2). Выбор КА и аппаратуры наблюдения осуществляется по степени наилучшего приближения частных характеристик существующих типов КА ДЗЗ к требуемым характеристикам.

На основе анализа существующих и перспективных аппаратов ДЗЗ и требований к космической информации, необходимой для мониторинга состояния лесов (глава 2), разработаны ориентировочные эталонные показатели (таб. 4).

Пороговое значение функции $d^{<i>}$ близости, i=1, 2, 3, задано как модуль разности определенных (вектор $X^{<i>}$) и эталонных (вектор X^{*}) показателей: $d^{<i>} = | X^{<i>} - X^{*} |$.

Ранжируя полученные результаты выбора типа КА и его оснащения (табл. 5 и 6, рис. 6), определяем варианты рационального построения (состава) системы наблюдения за состоянием леса (табл. 7), отвечающие максимальным значениям сводного показателя ранжирования, т.е. максимально приближенные к характеристикам, требуемым для решения поставленной задачи.

Таблица 4

Эталонные показатели для выбора КА ДЗЗ и аппаратуры наблюдения

Характеристики	Значение	Пороговое значение функции близости
Высота орбиты, H, км	600	300
Наклонение орбиты, i, град.	70	28
Ширина полосы обзора,B, км	50	30
Пространственное разрешение, R, м	10	5
Число спектральных каналов, Q	4	2
Длина волны, L, см	23,5	0,5
Периодичность наблюдений, T, сут.	18	2

Таблица 5

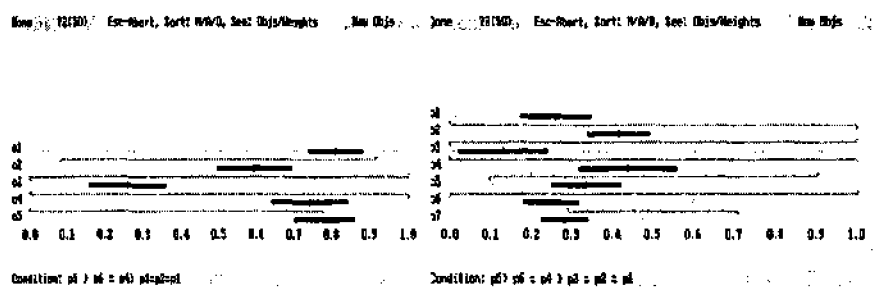
Значения сводного показателя ранжирования КА ДЗЗ со спектрозональной аппаратурой на борту, рассчитанного по программе «ASP»

КА ДЗЗ	Land-sat	Spot-5	IRS-P3	Ресурс-ДК1	Бел-КА	Монитор-И	Монитор-Э
Математическое ожидание	0.262	0.417	0.130	0.439	0.334	0.249	0.282
Дисперсия	0.089	0.078	0.110	0.122	0.086	0.071	0.058

Таблица 6

Значения сводного показателя ранжирования КА ДЗЗ с радиолокационной аппаратурой на борту, рассчитанного по программе «ASP»

КА ДЗЗ	Radarsat	Монитор-Р23	ERS-2	КОНДОР-Э	Аркон-2
Математическое ожидание	0.810	0.593	0.258	0.741	0.780
Дисперсия	0.071	0.10	0.102	0.102	0.081



а) КА ДЗЗ с радиолокационной аппаратурой на борту

б) КА ДЗЗ со спектрозональной аппаратурой на борту

Рис. 6. Визуализация результатов расчета по программе «ASP»

Таблица 7

Варианты рационального построения системы наблюдения

КА ДЗЗ	*Характеристики*					
	H	i	B	R	Q	L
	Вариант 1					
Ресурс – ДК1	350-610	64,8 и 70,4	28,3	2…3	3	
Аркон - 2	550-650	96	450 250	3…30 30		23 70
	Вариант 2					
Spot - 5	830	98,7	120	10	4	
Radarsat	798	98,6	20-500	3-100		23,5
	Вариант 3					
БелКА	510	97,6	20	10	3	
Кондор - Э	450…900	98	2-500	1…3		23,5

Показатель информативности многолетних данных космического мониторинга с использованием ДДЗ КА наблюдения определяется по формулам:

$$I_n = I \cdot n_O \ , \qquad (13)$$

где I_n – суммарная информативность полученного изображения земной поверхности, бит;

n_O – количество наблюдений одного и того же участка земной поверхности;

$$I = N \cdot Q = Q \sum_{j=1}^{q} \frac{S^n_{терр.}}{l_j^2} \ , \qquad (14)$$

где N – количество пикселей в кадре;

Q – количество информации, получаемой с одного пикселя дистанционного изображения (бит):

$$Q = q, \qquad (15)$$

где l_j – линейное разрешение изображения, полученного в j-м спектральном диапазоне, м;

$S^n_{терр.}$ – площадь территории, изображение которой получено в одном кадре (сцене), м^2;

q – количество спектральных диапазонов, лежащих внутри заданного диапазона, определяемого спецификой решаемой задачи.

Результаты расчетов показателя информативности представлены в табл. 8 и на рис. 7.

Таблица 8

Исходные данные и результаты расчетов показателя информативности, соответствующих наблюдениям заданного лесного массива в течение 1 года

КА	Характеристики аппаратуры наблюдения		I, Мбит	n_0	I_n, Мбит
	l_r, м	$S^{''}_{терр.}$, $м^2$			
SPOT 5	10,0	$36 \cdot 10^8$	72	10	720
Ресурс – ДК	3,0	$784 \cdot 10^6$	174	10	1740
БелКА	10,5	$4 \cdot 10^8$	76	10	760
RADARSAT	3-100	$25 \cdot 10^8$	200	10	2000
Аркон-2	3-30	$100 \cdot 10^6$	80	10	800
Кондор-Э	1-3	$100 \cdot 10^6$	88	10	880

Примечание: для спектрозональной аппаратуры q=2, для радиолокационной q=8.

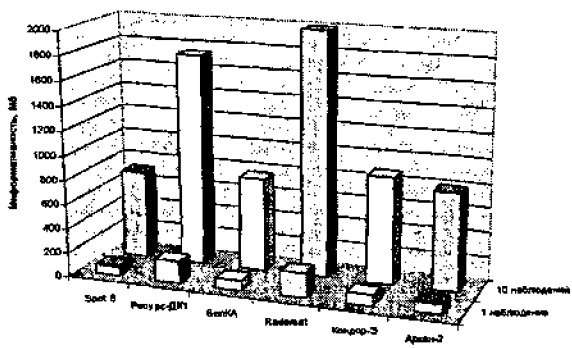


Рис. 7 Информативность КА ДЗЗ

Таким образом, чем выше разрешения аппаратуры: пространственное, спектральное и радиометрическое, тем выше информативность. Кроме того, увеличение информативности достигается за счет увеличения числа наблюдений.

Проведена оценка достоверности интерпретации данных космического мониторинга состояния леса при учете динамики развития растительного покрова. При учете многолетней динамики развития растительного покрова достоверность интерпретации данных космического мониторинга состояния леса может быть существенно повышена. Вывод о повышении достоверности интерпретации данных космического мониторинга состояния леса при учете динамики развития растительного покрова может быть подтвержден, исходя из следующих соображений.

Пусть P_0 – вероятность события, заключающегося в правильной интерпретации результатов однократного наблюдения при какой-либо заданной процедуре интерпретации. Очевидно, что при числе наблюдений $n > 1$ достоверность интерпретации должна возрасти. В том случае, если правила классификации не меняются, достоверность интерпретации (нижнюю границу вероятности правильной интерпретации n наблюдений одного и того же леса) можно определить как

$$Pn = 1-(1 - P_0)^n. \qquad (16)$$

Следовательно, кратность повышения достоверности интерпретации в случае временного ряда длиной из n наблюдений можно оценить по формуле

$$D = \frac{P_n}{P_0} = \frac{1-(1-P_0)^n}{P_0}. \qquad (17)$$

Результаты расчета кратности повышения достоверности интерпретации для различных значений P_0 и n представлены на рис. 8.

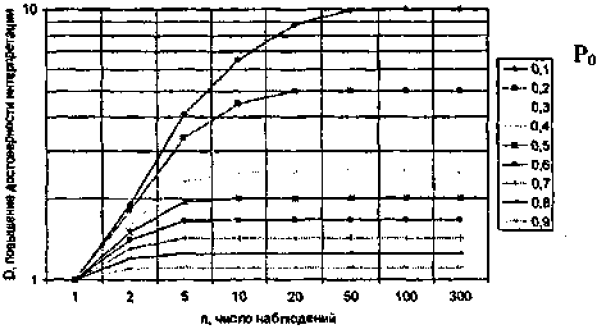


Рис. 8. Кратность повышения достоверности интерпретации данных космического мониторинга состояния леса при учете динамики развития растительного покрова с возрастанием количества наблюдений

Как видно из рис. 8, в том случае, если использовать существующие методы тематической обработки ДДЗ, повышение достоверности интерпретации данных космического мониторинга состояния леса на порядок можно получить при простом увеличении количества наблюдений до 10. Проводить большее количество наблюдений не имеет смысла, поскольку увеличение достоверности при этом незначительно.

Предлагаемая же новая процедура интерпретации начинает работать при любом количестве наблюдений $n > 1$ (при единичном наблюдении ее использование просто не имеет смысла) и минимум на порядок позволяет повысить достоверность интерпретации ДДЗ. В результате единичного наблюдения можно достаточно точно классифицировать экологическое состояние леса

только при видимых существенных изменениях спектральных характеристик, указывающих на угнетенное состояние растительности. Однако такую информацию, скорее всего, нельзя будет использовать на практике: слишком поздно: начались необратимые изменения, потенциал самовосстановления лесной экосистемы исчерпан. На ранних же стадиях техногенной сукцессии, когда видимых изменений (во всяком случае, обнаруживаемых принятыми процедурами тематической интерпретации) еще нет, только предлагаемая методика позволяет определить истинное состояние наблюдаемого леса.

Апробация разработанного методического аппарата проводилась на примере двух участков лесных массивов Карелии – один из них находится вблизи алюминиевого завода, а другой на территории заказника «Толвоярви». Исходными данными послужили результаты наземных дендрохроноэкологических исследований. Экологическое состояния лесного массива, находящегося вблизи алюминиевого завода, оценивалось по разработанной в данной работе методике. Проведенный анализ временных рядов биопродуктивности на двух участках леса с выделением сукцессионной, циклической и случайной составляющей и последующей их оценкой показал, что наблюдается резкое снижение направленности сукцессионного тренда для участка вблизи алюминиевого завода, снижение коэффициентов корреляции между гармоническими составляющими рядов оцениваемого участка, эталонного и солнечной активности. Случайная составляющая ряда биопродуктивности оцениваемого участка превосходит случайную составляющую эталонного ряда. Все это позволяет сделать вывод о том, что экологическое состояние участка леса, расположенного вблизи алюминиевого завода можно оценить как нарушенное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных исследований в диссертации разработан комплекс методик предпроектного обоснования применения космических средств наблюдения для мониторинга состояния лесов, обеспечивающий повышение информативности и достоверности оценки состояния лесов на основе применения космических средств наблюдения и учета динамики развития растительного покрова.

2. Разработана модель динамики развития леса, описывающая изменения сукцессионной, циклической и случайной составляющих биопродуктивности выделенного лесного гэпа в зависимости от начального состояния биопродуктивности, активности Солнца, измеряемого в числах Вольфа, и уровня техногенного воздействия. Расчеты, проведенные на модели, и сравнение результатов расчетов с наземными таксационными наблюдениями подтвердили, во-первых, адекватность модели реальным природным процессам, а во-вторых - эффективность оценки состояния лесов на основе наблюдений за динамикой их биологической продуктивности.

3. Методика оценки биологической продуктивности леса на основе дистанционной космической информации в отличие от ранее известных предлагает использовать для ее оценки комплексирование космических спектрозональных и радиолокационных изображений, что позволяет повысить точность и достоверность измерений за счет использования нескольких независимых признаков растительных образований: индекса жизненности и пространственной структуры.

4. Разработана методика классификации экологического состояния леса, исходящая не только из наблюдаемых признаков состояния леса, но и из тенденций их изменения. Исходными данными для классификации служат временные ряды изменения биопродуктивности заданного участка леса и эталонных лесных массивов, данные о динамике лесопокрытия, а также данные об активности Солнца (динамика изменения числа Вольфа). Методика позволяет интегрально оценивать экологическое состояние заданного участка леса и выявлять нарушения экологического состояния на ранних стадиях.

5. Методика расчета периодичности наблюдений разработана с учетом динамики показателя биопродуктивности, по которому оценивается экологическое состояние лесов. По предлагаемой методике периодичность наблюдений отличается для спектрозональной и радиолокационной аппаратуры, т.е. для листвы (хвои) и древесины. Согласно расчетам требуемая периодичность космических наблюдений при мониторинге экологического состояния лесно-

го массива составляет порядка 3-х недель для спектрозональной съемки и 2-х месяцев – для радиолокационной.

6. Разработаны требования к составу и характеристикам аппаратуры наблюдения. Исходя из решаемой задачи, должны использоваться два типа аппаратуры: спектрозональная и радиолокационная. Наибольшей информативностью для оценки экологического состояния лесов в оптическом диапазоне обладает зональное отношение КСЯ зеленой части спектра $r\lambda = 550$ нм к красной части спектра $r\lambda = 670$ нм. При радиолокационной съемке в качестве рабочей длины волны, используемой при дистанционном определении биопродуктивности леса, целесообразно выбрать L-диапазон.

7. Задача совместного выбора типа КА ДЗЗ (орбитальных параметров) и аппаратуры наблюдения решена с использованием метода стохастической квалиметрии. По результатам выбора КА ДЗЗ сформировано три рациональных варианта орбитальных группировок КА ДЗЗ.

8. Применение разработанного комплекса методик предпроектного обоснования применения космических средств наблюдения для мониторинга состояния лесов позволит:

- повысить достоверность оценки состояния лесов для уменьшения эколого-экономического и социального ущерба от воздействий природного и техногенного характера;
- прогнозировать по данным космических наблюдений развитие кризисной экологической ситуации;
- обосновать своевременные природоохранные мероприятия и решать с помощью космических средств наблюдения практические задачи лесного мониторинга в системе управления лесным хозяйством России на федеральном и региональном уровнях.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Kljushnikow V.Y., Tishina E.V. Screening of the state of of the Earth's biosphere using cosmic means // International Conference "Mathematical Modelling of Ecological Systems". – Almaty: Daik-Press, 2003, p. 111.Скрининг состояния биосферы Земли космическими средствами. // Международная конференция «Математическое моделирование экологических систем. Алма-Ата, 2003, с. 111–115.
2. Тишина (Рыжова) Е.В. Использование флуктуаций биологических закономерностей развития лесного покрова в качестве индикационных признаков для космической интерпретации данных дистанционного зондирования./ Материалы XXXIX научных чтений памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 2004, с. 169–170.
3. Клюшников В.Ю., Тишина Е.В. Способ выявления направленности многолетнего тренда экологического состояния природного комплекса. // Экологические проблемы разработки и эксплуатации ракетно-космической техники. Материалы 5-го научно-практического семинара: Сб. трудов СИП РИА. Выпуск 11 / Под ред. Л.И. Волкова, В.Л. Лукина. – М.: СИП РИА, 2004, С. 53–54.
4. Тишина (Рыжова) Е.В. Требования, предъявляемые к бортовой аппаратуре наблюдения и баллистическому построению системы КА мониторинга лесов. / Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики. Труды XXIX академических чтений по космонавтике, январь 2005, с. 213–215.
5. Клюшников В.Ю., Рыжова Е.В. Дистанционная фитоиндикация в диагностике состояния природного комплекса. – «Сенсор», №3, 2005, с. 22–25.
6. Рыжова Е.В. Подход к космическим наблюдениям за общим состоянием растительного покрова./ Материалы XL научных чтений памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 2005, с. 168–170.
7. Рыжова Е.В. Наблюдение флуктуаций биоритмологических закономерностей развития растительного покрова из космоса. / Второй белорусский космический конгресс, Минск, 2005, с. 369–371.
8. Рыжова Е.В. Методика оценки состояния лесных массивов с использованием космических средств./6-я международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос», Звездный городок «Центр подготовки космонавтов», 2005, с. 134–135.

9. Рыжова Е.В. Техническая основа системы мониторинга лесов. / Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – Вып. № 48 – М.: МГУЛ, 2006, с. 63–67.

10. НТО «Исследование принципов построения, возможностей повышения технического уровня и эффективности функционирования отечественных КА ДЗЗ», шифр «Мониторинг – 3», № 851-0300/04-12-2005-4501-45-89, ЦНИИМАШ, 2005, 9 с.

11. НТО «Анализ комплекса бортовой целевой и служебной аппаратуры на разрабатываемых перспективных отечественных ИСЗ ДЗЗ и их характеристик (элементной базы); сравнение с бортовой целевой и служебной аппаратурой на аналогичных зарубежных КА с целью оценки полноты решения задач ДЗЗ. Исследование методов наблюдения из космоса для решения задач ДЗЗ», № 851-2111/06-4.2-2006-1041-104-14, ЦНИИМАШ, 2006, 12 с.

12. НТО «Исследование потенциала гиперспектральной съемки при решении задач контроля экологического состояния лесных и лесопарковых массивов», ЦНИИМАШ, 2006, 8 с.