

# Спутниковый мониторинг бореальных экосистем



С.А.Барталев, Е.А.Лупян

Существуют многочисленные свидетельства тесной взаимосвязи стремительно нарастающих глобальных изменений климата планеты с процессами трансформации биосферы. Особенно заметно они проявляются в бореальном (северном) поясе планеты и, в частности, в Северной Евразии. Известно, что даже недолговременные климатические вариации напрямую влияют на продуктивность экосистем, на интенсивность таких возмущающих экосистемы факторов, как степные и лесные пожары и вспышки размножения насекомых-фитофагов, а косвенно — на хозяйственную активность человека. Динамика растительного покрова оказывает воздействие на климат посредством изменения энерго- и водообмена, а также биогеохимических циклов. Вариации площади, структурных характеристик и видового состава лесов и других типов растительного покрова приводит к увеличению или уменьшению альбедо подстилающей поверхности и, следовательно, к перераспределению потоков солнечной энергии между коротковолновым отраженным и длинноволновым тепловым излучением. Вследствие изменений продуктивности наземных



**Сергей Александрович Барталев**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией мониторинга бореальных экосистем ИКИ РАН. Область научных интересов — дистанционное зондирование растительности, методы обработки спутниковых данных, глобальная экология, изменения климата.



**Евгений Аркадьевич Лупян**, доктор технических наук, заместитель директора и заведующий отделом технологий спутникового мониторинга того же института. Специалист в области дистанционного зондирования, методов технологии автоматической обработки и архивации спутниковых данных, создания систем мониторинга окружающей среды, разработки информационных систем.

экосистем меняются также структуры и скорости биогеохимических циклов, что в свою очередь отражается на составе атмосферы и характеристиках климата.

Существующие в настоящее время спутниковые приборы и методы анализа данных дистанционного зондирования позволяют регулярно получать оценки многих характеристик рас-

тительного покрова, необходимых для исследований изменений климата и биосферы (табл.1, 2), и прогнозировать последние с помощью моделирования. Отметим также, что во многих случаях выявление и исследование крупномасштабных изменений растительного покрова возможно только на основе спутниковых методов, поскольку они при глобальном ох-

© Барталев С.А., Лупян Е.А., 2005

Таблица 1

## Приоритетные направления спутникового мониторинга наземных экосистем для исследований изменений климата и биосферы

Основные задачи	Наблюдаемые объекты и явления	Оцениваемые характеристики
Картографирование и оценка структуры наземных экосистем	Растительный покров различных биомов Водно-болотные комплексы Не покрытые растительностью земли Гидрографические объекты	Растительность: жизненные формы тип вегетативных органов тип фенологической динамики видовой состав возрастная структура
Оценка биофизических и биохимических характеристик растительности	Растительный покров	Надземная биомасса: индекс листовой поверхности доля поглощенной ФАР* и объем первичной продукции концентрация хлорофилла трехмерная структура растительного покрова
Оценка возмущающих воздействий на растительность	Растительные пожары Вырубки лесов Факторы биотического воздействия Факторы техногенного воздействия Восстановительная динамика растительности	Тип фактора воздействия: площадь повреждений типы поврежденной растительности время события степень повреждений скорость восстановления растительности после воздействия
Оценка характеристик землепользования	Пахотные земли Пастбища Леса	Режимы и интенсивность сельскохозяйственного и лесохозяйственного использования земель
Оценка фенологических ритмов наземных экосистем	Фенологическая динамика экосистем	Продолжительность: залегания снежного покрова вегетационного сезона Сроки наступления фенологических фаз развития
Оценка многолетних трендов состояния наземных экосистем	Границы биомов и зоны перехода между биомами Структура растительного покрова Биофизические характеристики растительности Режимы землепользования Возмущающие воздействия на растительность Фенологические ритмы растительности	Наличие трендовой динамики Направление трендовой динамики Скорость трендовой динамики
Оценка физических характеристик поверхности	Все типы наземных экосистем	Альbedo поверхности Температура поверхности Влагосодержание растительного и почвенного покровов

\* ФАР — фотосинтетически активная радиация, т.е. используемая при фотосинтезе часть солнечной радиации с длинами волн 0.38–0.71 мкм.

вате планеты данными наблюдений позволяют получать многие детальные характеристики земной поверхности.

При картографировании растительного покрова — основного компонента наземных экосистем — учитывают такие характеристики растительности, как жизненные формы (деревья, кустарники, травы, мхи и лишайники), типы вегетативных органов (хвойные, лиственные) и фенологической динамики (вечнозеленые, листопад-

ные), видовой состав и возрастную структуру лесов.

Адекватное описание и моделирование процессов энерго-массообмена в системе растительность—атмосфера тесно связано с получением оценок биофизических и биохимических характеристик растительного покрова, таких как биомасса, площадь листовой поверхности, объем чистой первичной продукции, доля поглощаемой фотосинтетически активной радиации, концентрация хлорофилла,

трехмерная структура растительности. Эти характеристики чрезвычайно важны для определения компонентов углеродного цикла в наземных экосистемах, включая запас углерода и скорость его накопления экосистемой.

Оценка факторов возмущающего воздействия на растительность — приоритетная составляющая спутникового мониторинга наземных экосистем, поскольку такого рода воздействия в значительной мере оп-

Таблица 2

**Возможности спутниковых приборов наблюдения Земли в оптическом диапазоне длин волн для мониторинга наземных экосистем**

Основные задачи	Спутниковые приборы			
	Низкое разрешение (~1 км)	Среднее разрешение (250–500 м)	Высокое разрешение (20–50 м)	Детальное разрешение (1–5 м)
<b>Картографирование экосистем</b>	NOAA-AVHRR SPOT-Vegetation Terra/Aqua-MODIS	Terra/Aqua-MODIS Envisat-MERIS	Landsat-TM/ETM+ Terra-ASTER SPOT- HRV/HRVIR Meteop-3M/MCY-Э IRS-LISS	IKONOS Quick-Bird SPOT-HRG IRS-PAN
<b>Оценка биофизических и биохимических характеристик растительности:</b>				
зеленой биомассы	-//-	-//-	-//-	—
концентрации хлорофилла	—	Envisat-MERIS	—	—
трехмерной структуры растительности	SPOT-Vegetation	Terra-MISR Terra/Aqua-MODIS	—	—
<b>Оценка возмущающих воздействий:</b>				
действующих пожаров	NOAA-AVHRR Terra/Aqua-MODIS	Terra/Aqua-MODIS	Landsat-TM/ETM+ Terra-ASTER	—
последствий пожаров	NOAA-AVHRR SPOT-Vegetation Terra/Aqua-MODIS	-//-	Landsat-TM/ETM+ Terra-ASTER SPOT-HRV/HRVIR Meteop-3M/MCY-Э IRS-LISS	IKONOS Quick-Bird SPOT-HRG IRS-PAN
последствий воздействия биотических и техногенных факторов	-//-	-//-	-//-	-//-
вырубки лесов	—	-//-	-//-	-//-
<b>Оценка землепользования</b>	NOAA-AVHRR SPOT-Vegetation Terra/Aqua-MODIS	-//-	-//-	-//-
<b>Оценка фенологических ритмов экосистем</b>	-//-	-//-	—	—
<b>Оценка многолетних трендов состояния экосистем</b>	-//-	-//-	Landsat-TM/ETM+ SPOT- HRV/HRVIR	—
<b>Оценка физических характеристик поверхности</b>	NOAA-AVHRR Terra/Aqua-MODIS	-//-	Landsat-TM/ETM+ Terra-ASTER	—

ределяют потоки углерода между наземными экосистемами и атмосферой, характеристики энерго- и водообмена. Методы получения таких оценок основаны на выявлении изменения характеристик растительного

покрова с использованием временных серий данных спутниковых наблюдений. Ныне они используются для изучения, например, пожаров, вырубок лесов, гибели растительного покрова из-за вспышек массового

размножения насекомых, а также деградации и гибели растительности в результате техногенных загрязнений.

Оценка характеристик землепользования включает определение площадей и режимов

сельскохозяйственного использования пахотных земель и пастбищ, а также лесов, находящихся под интенсивным управлением человеком. Получение такой информации необходимо, поскольку методы и интенсивность обработки почв в значительной мере влияют на потоки углерода в атмосферу, альбедо поверхности и испарение почвенной влаги. Лесные насаждения с интенсивным ведением лесного хозяйства по своим продукционным характеристикам, породной и возрастной структуре могут отличаться от естественных лесных экосистем, что также отражается на параметрах энергомассообмена с атмосферой. Изменения такого рода вызываются также и переменами характера и интенсивности землепользования, в частности, приводящими к зарастанию заброшенных сельскохозяйственных земель лесами или выражающимися в распаивании степей для наращивания объемов сельскохозяйственного производства.

Одно из необходимых направлений спутникового мониторинга наземных экосистем — оценка фенологических ритмов, характеристики которых могут служить индикаторами влияния происходящих климатических изменений на состояние растительного покрова и других компонентов экосистем. К числу наиболее важных характеристик такого рода относятся продолжительность залегания снежного покрова, даты начала и окончания вегетационного периода, а также сроки наступления основных фенологических фаз развития растительности.

Оценки многолетних трендов состояния наземных экосистем необходимы для выявления и интерпретации долговременных изменений их фенологических ритмов, биофизических характеристик растительности, частоты и масштабов пожаров, интенсивности землепользования, проявления био-

логических факторов воздействия на растительный покров, видового состава растительности и положения границ биомов.

В настоящее время спутниковые методы позволяют также проводить оценку физических характеристик поверхности, таких, в частности, как альбедо, температура и влагосодержание, которые используются в качестве входных переменных во многих моделях динамики роста растительности, необходимых для оценок объемов чистой первичной продукции, интенсивности стока углерода и накопления его в растительной биомассе.

При наблюдениях за состоянием и динамикой наземных экосистем в настоящее время используют широкий набор спутниковых приборов дистанционного зондирования, различающихся уровнем пространственного разрешения, спектральными каналами, частотой наблюдения и некоторыми другими параметрами. По уровню пространственного разрешения выделяют несколько групп спутниковых данных.

**Данные низкого разрешения** (~1 км) получают с помощью NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation, Terra/Aqua-MODIS и некоторых других систем, проводящих измерения оптического излучения в широком диапазоне длин волн. Они имеют высокую периодичность наблюдений и способны не реже, чем ежесуточно, обеспечивать глобальное покрытие Земли в зависимости от широты местности (в бореальной зоне до двух-трех раз в сутки).

**Данные среднего разрешения** (~250—500 м) получают с аппаратов Terra/Aqua-MODIS и Envisat-MERIS. Эти системы способны обеспечить глобальное покрытие Земли в течение 1—3 дней и также проводят измерения в широком диапазоне длин волн оптического спектра.

**Данные высокого разрешения** (~20—50 м) собираются многоспектральными сканиру-

ющими радиометрами типа Landsat-ETM+, SPOT-HRVIR, Terra-ASTER, Метеор-3М/МСУ-Э и IRS-LISS. Они обеспечивают, как правило, частоту наблюдений не чаще чем один раз в две недели.

**Данные детального разрешения** (~1—5 м) могут быть получены такими спутниковыми системами, как IKINOS, Quick-Bird, SPOT-HRG и IRS-PAN. Их применяют, как правило, для выборочных нерегулярных наблюдений.

Выполненные в последние годы исследования по использованию спутниковых данных многоугловых измерений отраженного излучения позволяют изучить структурные характеристики растительного покрова, например, высоту и сомкнутость полога [1]. Комбинированное использование различных данных, алгоритмов их анализа и методов пространственного моделирования обеспечивает практическую непрерывность наблюдений при глобальном или континентальном охвате территории и позволяет в ряде случаев получить детальные характеристики объектов и явлений. Работы в этом направлении в нашей стране в последние годы активно проводятся в Институте космических исследований РАН в сотрудничестве с Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, а также рядом других ведущих организаций Российской академии наук и западноевропейских партнеров, таких как Объединенный исследовательский центр Европейской комиссии. Ниже будут кратко представлены основные направления и результаты таких работ.

**Картографирование наземных экосистем.** Данные спутниковых приборов низкого пространственного разрешения нашли широкое применение для картографирования экосистем на глобальном уровне. К настоящему времени разработаны карты наземных экосистем по данным NOAA-AVHRR в рамках про-

ектов IGBP-DIS [2] и университета Мэриленд [3], а также по данным SPOT-Vegetation (рис.1) в рамках проекта Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии GLC-2000 (Global Land Cover) [4] и данным Terra-MODIS в рамках проекта, выполняемого Университетом Бостона [5].

Разработанная по данным, полученным с аппарата SPOT-Vegetation с пространственным разрешением 1 км, карта наземных экосистем России [6] представляет собой наиболее современное описание географического распределения экосистем в нашей стране (рис.2). На ней представлены основные типы лесных формаций, кустарниковой и травяной растительности, болот, тундровых экосистем и ряда других, не покрытых растительностью, типов поверхности. Легенда карты содержит 25 тематических классов, формирующих семь различных групп.

Метод анализа спутниковых данных, использованный для создания карты, включал в себя предварительную обработку изображений с целью формирования набора производных продуктов спутниковых данных, обладающих улучшенными для изучения наземных экосистем свойствами, и последующую их классификацию.

Вначале выявлялись участки, покрытые снегом, облаками или тенями от них, а также — на основе использования данных спектрального отражения и нормализованного разностного индекса снега — наблюдения, искаженные в результате аппаратных сбоев [7]. Спутниковые данные, очищенные от влияния этих факторов, позволили сформировать следующие признаки для классификации [6]:

1) среднесезонные значения спектральной яркости, соответствующие весеннему, летнему и осеннему периодам;

2) индекс оптической анизотропии поверхности;

3) индекс влажности;

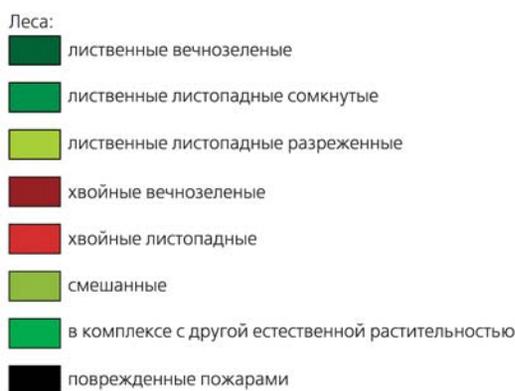
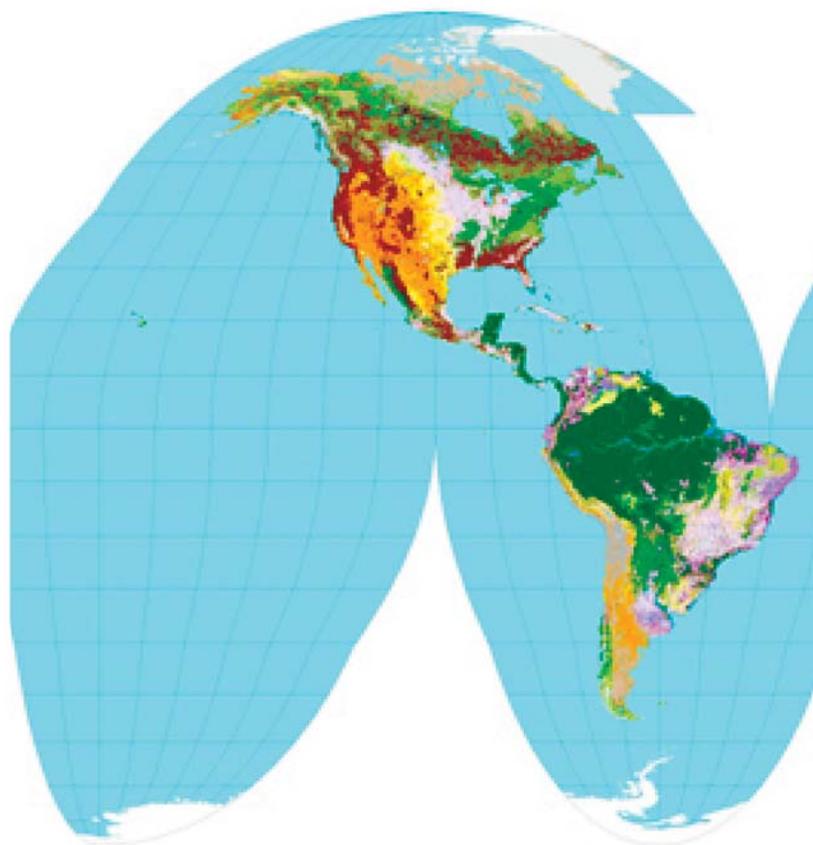
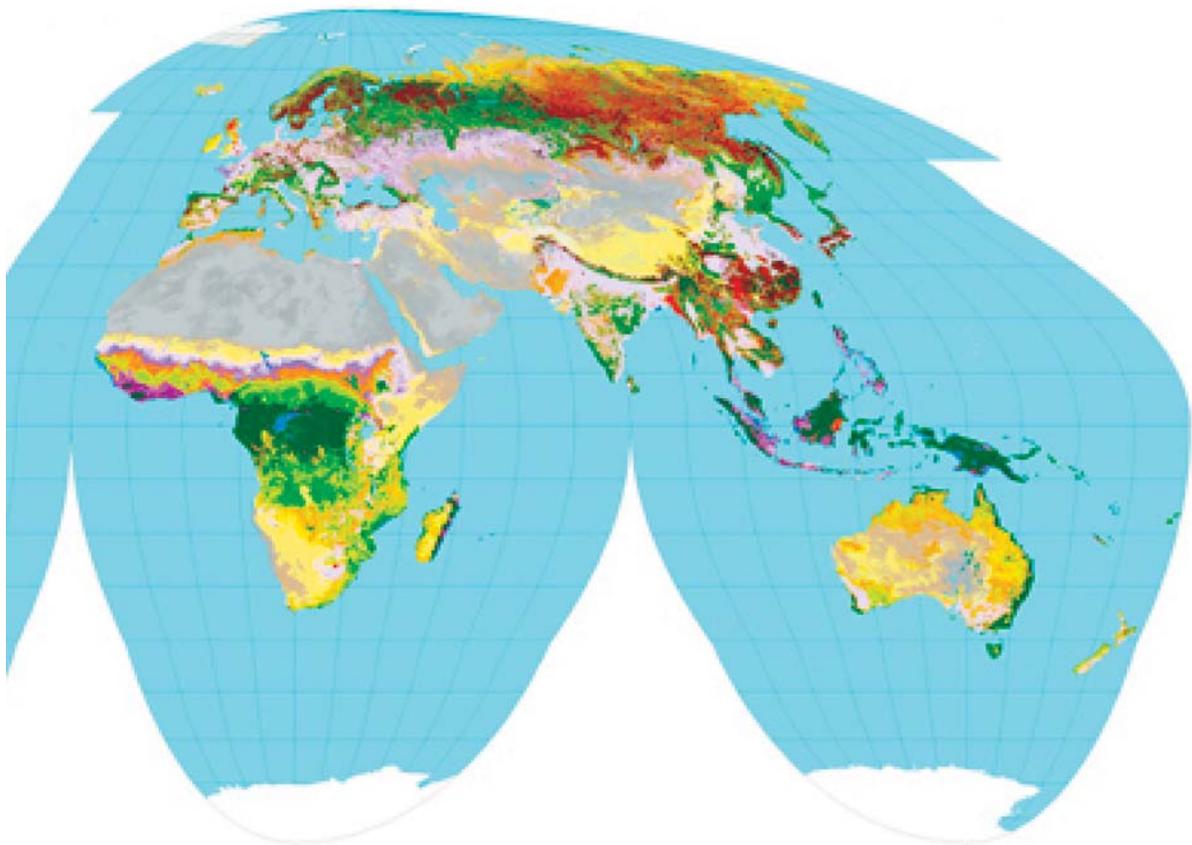


Рис.1. Глобальная карта наземных экосистем, составленная по данным прибора SPOT-Vegetation в рамках проекта GLC-2000.

4) индекс волнового подобию, характеризующий меру отличия временного профиля значений нормализованного разностного вегетационного индекса в течение всего вегетационного сезона от идеализированного сезонного профиля;

5) продолжительность периода залегания снежного покрова.

Сравнение разработанной карты наземных экосистем с картой лесов России, созданной в 1990 г. на основе данных инвентаризации лесов, полученных для части северных тер-



## Сельскохозяйственные территории:

- сельскохозяйственные угодья
- в комплексе с лесами
- в комплексе с травянистой и кустарниковой растительностью

## Пустыни:

- песчаные
- галечные
- каменные

## Водные объекты

- Снега и льды

## Увлажненные земли:

- леса, регулярно затопляемые пресной или солоноватой водой
- леса, регулярно затопляемые соленой водой
- регулярно затопляемая травянистая или кустарниковая растительность

## Травянистая и кустарниковая растительность:

- вечнозеленые кустарники
- листопадные кустарники
- травянистая растительность
- разреженная травянистая или кустарниковая растительность
- Антропогенные объекты

риторий Сибири еще в 50-х годах XX в. методами аэровизуальных наблюдений, позволяет по-новому взглянуть на многие экологические и ресурсные аспекты. Эта карта, например, впервые наглядно продемонстрировала масштабную смену

коренных хвойных лесов вторичными лиственными лесами в европейской части России, Центральной Сибири и Дальнего Востока, произошедших в результате интенсивных вырубок и пожаров второй половины прошлого столетия. В то же вре-

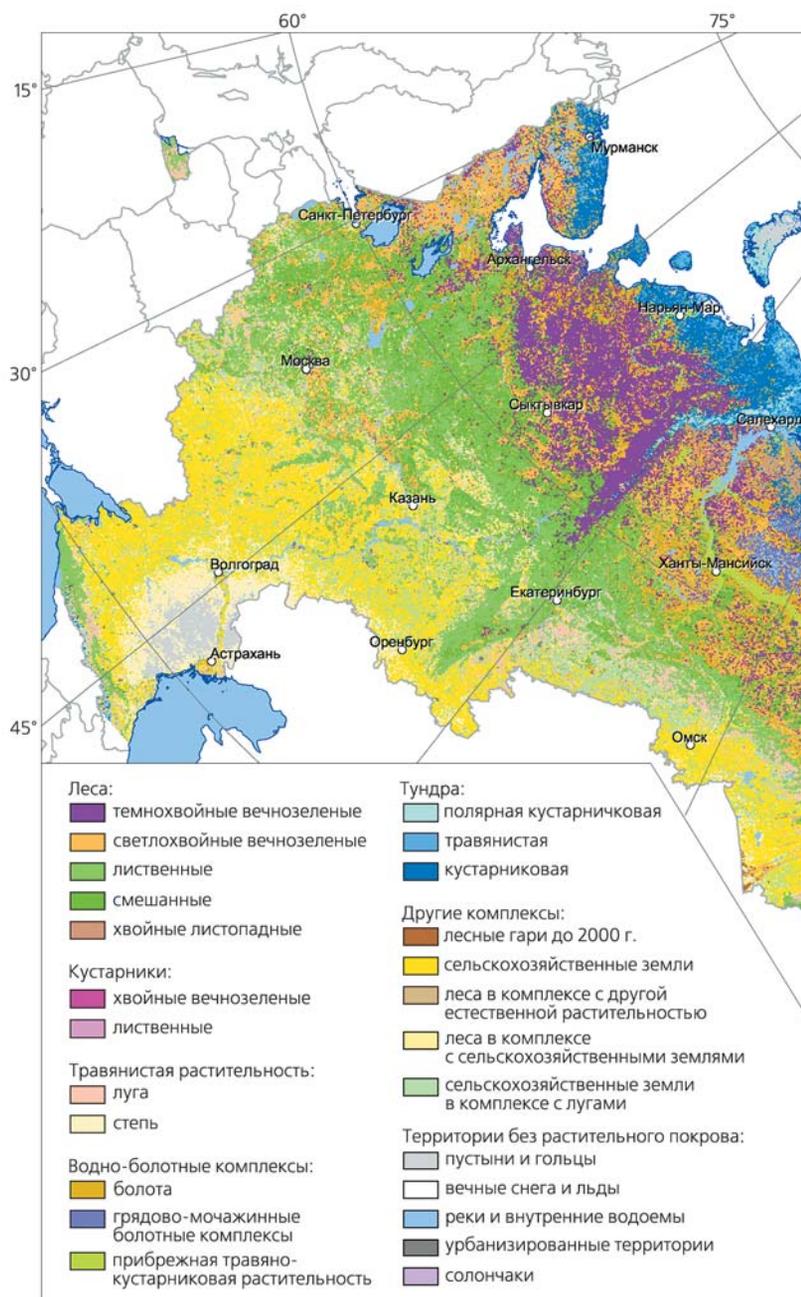
мя информация, полученная с помощью карты наземных экосистем, явно свидетельствует о массовом зарастании сельскохозяйственных земель в центральных регионах России, заброшенных в период постперестроечного спада экономики.

Разработанная карта наземных экосистем насчитывает более 300 пользователей в России, странах Западной Европы, США и Японии.

**Мониторинг последствий пожаров.** Выполненные исследования позволили разработать метод и автоматическую технологию, позволяющую на регулярной основе картографировать по спутниковым данным повреждения наземных экосистем бореальной зоны планеты пожарами (рис.3). Метод основан на совместном использовании временных серий данных спутниковых наблюдений SPOT-Vegetation и Terra/Aqua-MODIS. В нем используется комбинация спектральных признаков для выявления межгодовых изменений в состоянии растительности и обнаружения действующих пожаров по аномально высокой температуре поверхности.

Воздействие огня, в зависимости от интенсивности пожара и типов экосистемы, может приводить к гибели или изменению физиологических характеристик растительности, что, в частности, выражается в снижении влагосодержания и концентрации хлорофилла в зеленых фракциях растений. При этом также изменяется и спектральное отражение поврежденных участков в диапазонах длин волн, в которых происходит наиболее интенсивное поглощение оптического излучения молекулами хлорофилла и воды. Эти особенности лежат в основе использования спектрального вегетационного индекса SWVI (Short Wave Vegetation Index) [8], вычисляемого по данным ближнего ИК- и среднего ИК-спектральных каналов SPOT-Vegetation.

В качестве источника дополнительной информации используют результаты выявления активных пожаров по температурным аномалиям на основе спутниковых изображений Terra/Aqua-MODIS [9], согласованные по пространственному



разрешению и времени наблюдения с данными SPOT-Vegetation.

Сформированная с использованием разработанной технологии база данных представляет собой в настоящее время наиболее полный и достоверный источник сведений о повреждениях огнем растительного покрова бореальной зоны планеты.

Впервые стало возможно получить объективную информацию о пространственно-временных характеристиках повреждений растительности пожарами для всей этой зоны за относительно продолжительный период (2000—2004) при частоте наблюдений раз в 10 дней, что позволяет достаточно детально анализировать сезонную дина-

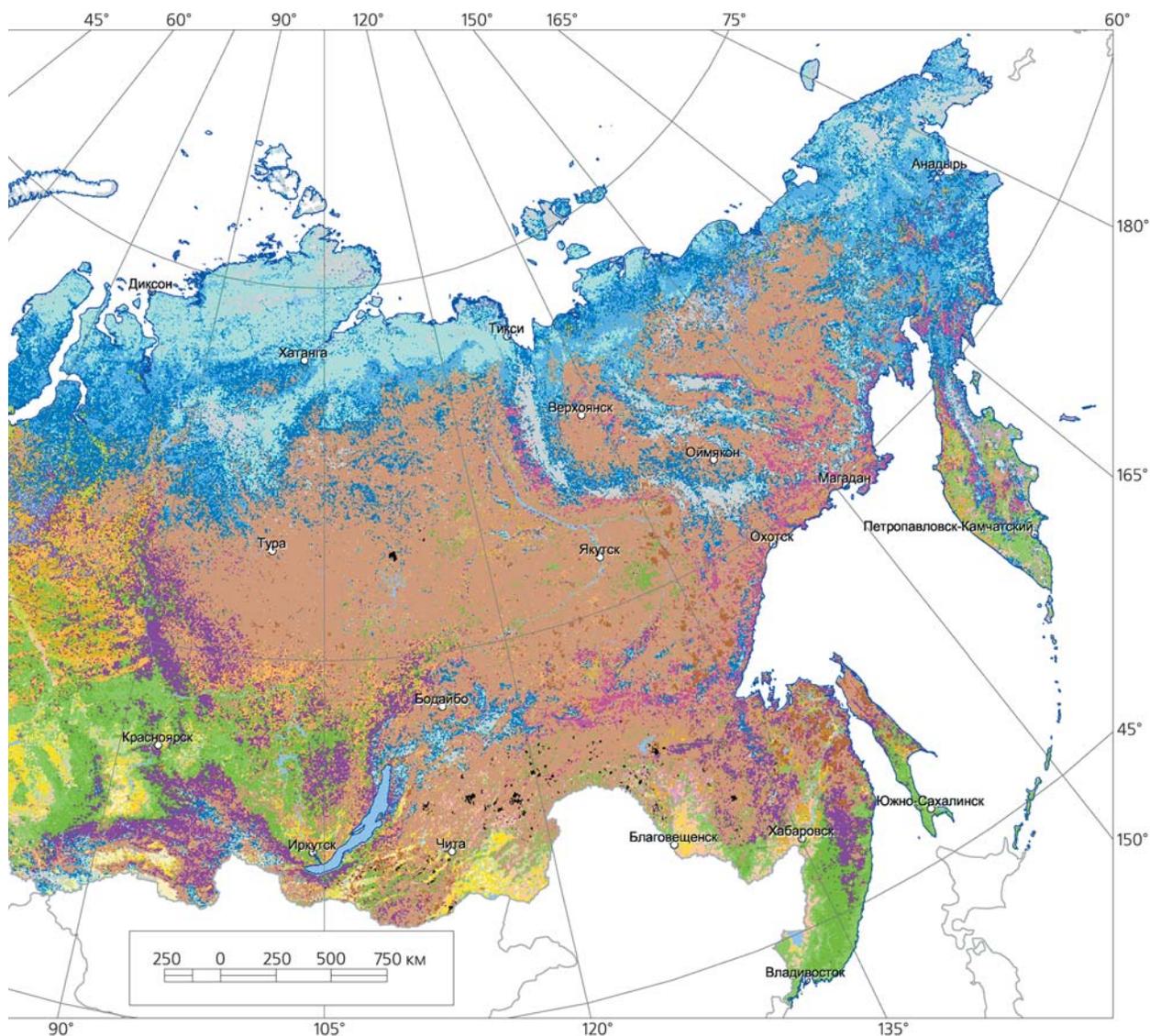


Рис.2. Карта наземных экосистем России, составленная по данным SPOT-Vegetation в рамках проекта GLC-2000 специалистами Института космических исследований РАН, Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН и Института окружающей среды (Европейская комиссия, Объединенный исследовательский центр, г.Испра (Италия)).

мику пожаров в различных типах наземных экосистем.

Созданная база данных может в настоящее время использоваться для эффективного управления природными и, прежде всего, лесными ресурсами, охраны окружающей среды и исследований, связанных с глобальными изменениями. Она позволяет оценить объемы

эмиссий углерода в атмосферу в результате пожаров, что делает ее важнейшим элементом информационного обеспечения, необходимого для выполнения Россией обязательств в соответствии с условиями Киотского протокола к рамочной конвенции ООН по изменению климата. Созданная технология картографирования поврежденной

огнем растительности активно используется сегодня в Информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства [10].

**Мониторинг вырубок лесов.** Комбинированное использование спутниковых данных среднего и высокого пространственного разрешения предс-

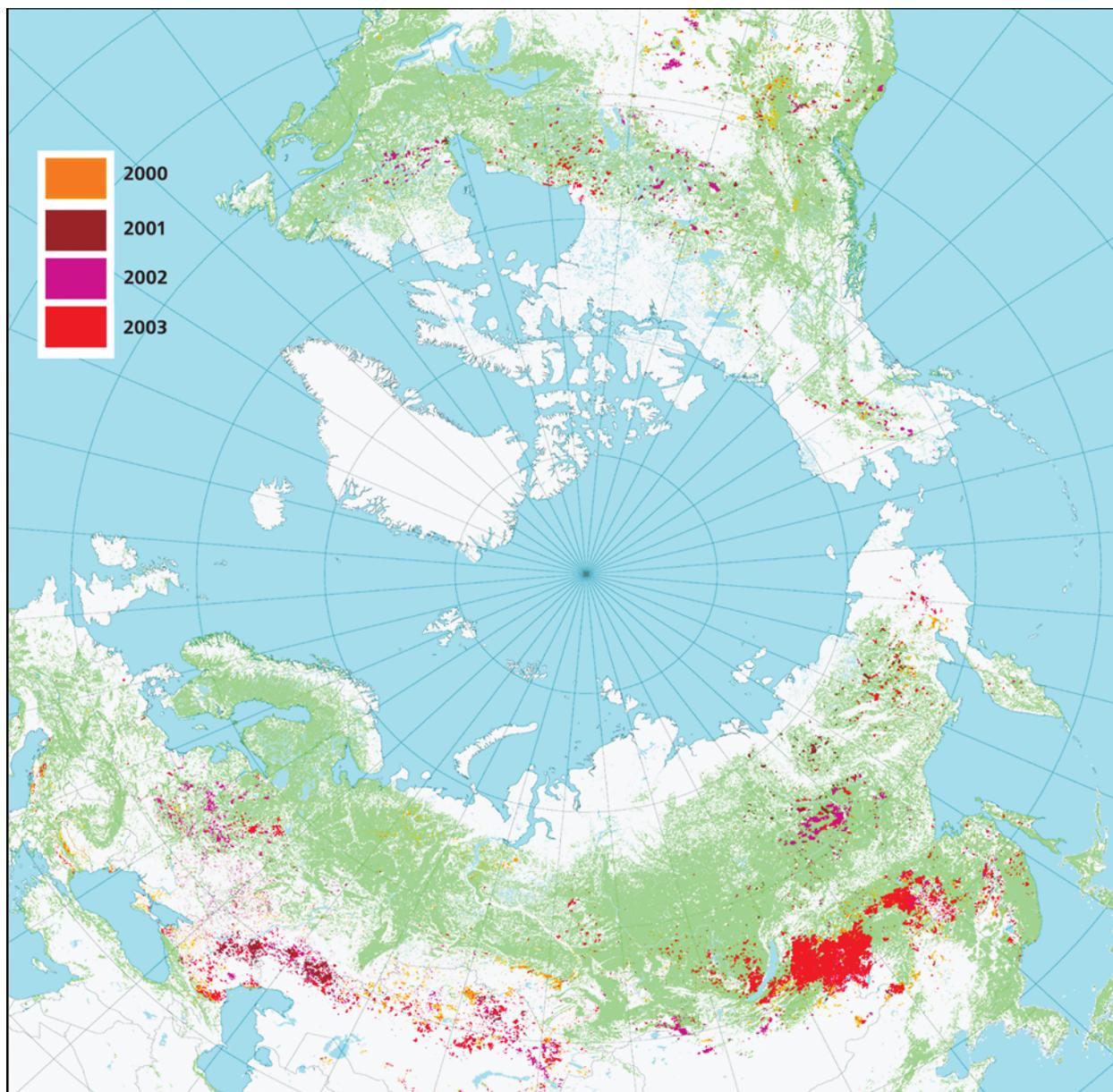


Рис.3. Циркумполярная карта бореальных экосистем, поврежденных пожарами в 2000—2003 гг., по данным прибора SPOT-Vegetation.

твляет информацию о масштабах вырубки лесов — одного из значимых факторов антропогенного воздействия на наземные экосистемы. В частности, использование временных серий спутниковых данных Terra/Aqua-MODIS и Envisat-MERIS позволяет выявить их в таежных регионах Европейского Севера России и Центральной Сибири, где площади выруб-

бок достигают 50 га. Там, где из-за ограничений лесопользования площади вырубок значительно меньше (до 10 га), целесообразно использование спутниковых изображений высокого разрешения.

Доступные в настоящее время архивы исторических изображений, полученных приборами MSS, TM и ETM+ со спутников серии Landsat, открывают уни-

кальную возможность получать достоверные данные об изменениях в лесах Северной Евразии и, в частности, о вырубках, произошедших с конца 70-х годов прошлого столетия. Разработанные автоматические методы выявления по разновременным спутниковым изображениям высокого разрешения долгосрочных изменений лесов в результате вырубок в настоящее время

апробированы на ряде тестовых участков таежной зоны Европейской части России.

#### Оценка пахотных земель.

Временные серии спутниковых данных среднего разрешения Terra/Aqua-MODIS находят широкое применение для оценки сельскохозяйственного использования земель. Алгоритмы автоматической обработки этих данных позволяют оценивать площади пахотных земель и их динамику, выявлять поля, засеянные озимыми и яровыми сельскохозяйственными культурами, определять параметры севооборота. Методы анализа также основаны на использовании многолетних серий ежедневных спутниковых данных и включают анализ динамики значений так называемого перпендикулярного вегетационного индекса [11]. Его значения вычисляются на основе измерений отраженного излучения в красном и ближнем инфракрасном каналах прибора Terra/Aqua-MODIS

таким образом, чтобы обеспечить независимость значений индекса от отражательных свойств почвенного покрова при сохранении высокой чувствительности к изменениям объема зеленой биомассы растительности. В настоящее время методы мониторинга сельскохозяйственных земель апробированы на ряде тестовых регионов южной части России и адаптируются к их распространению на всю территорию зернового пояса Северной Евразии.

**Информационная система.** В результате выполненных исследований к настоящему времени разработаны методики, а также накоплены обширные и регулярно обновляемые базы данных, отражающие состояние и динамику наземных экосистем Северной Евразии и бореальных экосистем в целом. Указанные данные чрезвычайно важны для использования в климатических моделях, моделирования биогеохимических цик-

лов, оценки характеристик биологического разнообразия и ряда других важных аспектов взаимодействия наземных экосистем с климатической системой Земли и человеческим обществом. Доступность этих данных широкому кругу ученых и специалистов — одно из необходимых условий проведения эффективных научных исследований по указанным направлениям. Разрабатываемая при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 04-07-90263-в) информационная система TerraNorte обеспечивает систематизированное хранение данных спутникового мониторинга наземных экосистем Северной Евразии, обновление географических баз данных по мере получения новых информационных продуктов, а также удаленный доступ к имеющимся данным заинтересованных пользователей на основе Интернет-технологий (<http://tem.iki.rssi.ru>). ■

## Литература

1. *Widlowski J.-L., Pinty B., Gobron N. et al.* // Climatic Change. 2004. V.67. P.403—415.
2. *Loveland T.R., Zhu Z., Oblen D.O. et al.* // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1999. V.65. P.1021—1032.
3. *Hansen M., DeFries R., Townshend J.R.G., Sohlberg R.* // Int. J. of Remote Sensing. 2000. V.21. P.1331—1365.
4. *Bartholomé E. and Belward A.S.* // Int. J. of Remote Sensing in press. March 2005.
5. *Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F. et al.* // Remote Sensing of Environment. 2002. V.83. P.287—302.
6. *Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S.* // Int. J. of Remote Sensing. 2003. V.24. №9. P.1977—82.
7. *Hall D.K., Riggs G.A., Salamonsen V.V.* // Remote Sensing of Environment. 1995. V.54. P.27—140.
8. *Stroppiana D., Pinnock S., Pereira J.M.C. and Gregorie J.-M.* // Remote Sensing of Environment. 2002. V.82. P.21—37.
9. *Justice C.O., Giglio L., Korontzi S. et al.* // Remote Sensing of Environment. 2002. V.83. P.244—262.
10. *Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Лупян Е.А. и др.* Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. М., 2004. С.47—57.
11. *Richardson A.J., Wiegand C.L.* // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1977. V.43. №2. P.1541—1552.