

УДК 528.8:630

## УНИКАЛЬНОСТЬ СОВРЕМЕННОГО ЭТАПА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЛЕСОВ РОССИИ

© 2015 г. А. С. Исаев, Т. В. Черненкова

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН**117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32*

E-mail: isaev@cepl.rssi.ru, chernenkova50@mail.ru

Поступила в редакцию 5.05.2015 г.

Обсуждается планетарная роль лесов России в формировании биоразнообразия растительного покрова, поддержании ресурсного, экологического потенциала и благоприятных для человека условий среды. Представлены история и методологическая основа мониторинга биоразнообразия бореальных лесов России на основе дистанционных и наземных данных. Она базируется на концептуальном подходе к изучению биоразнообразия с учетом пространственно-временной динамики лесообразовательного процесса и современного состояния лесов. Показано своеобразие современной оценки состояния лесного покрова с использованием данных дистанционного зондирования, которые рассматриваются в качестве важнейшей компоненты информационного обеспечения региональной естественной и антропогенной динамики лесов. Применение современных количественных методов ГИС-технологий на основе анализа спутниковых данных и цифровой модели рельефа (ЦМР) для установления пространственных и временных связей между ценотическим разнообразием и факторами внешней среды позволяет на новой основе подойти к изучению особенностей многомерной пространственной дифференциации лесного покрова. Интерполяция локальных измерений, полученных в процессе наземных исследований, на верхние масштабные уровни с использованием данных спектральной космической съемки и количественных методов ее обработки дают возможность сохранить важную информацию о структуре и свойствах растительности. Представлены примеры инвентаризации типологического разнообразия лесов на федеральном, региональном и локальном уровнях. Разработана система индикаторов, направленная на практическое применение в практике лесного хозяйства и природоохранной деятельности на региональном уровне, позволяющая выявить качественные изменения лесного покрова под влиянием климатических и антропогенных воздействий и выработать оптимальные меры по сохранению необходимого уровня биоразнообразия лесов территории.

**Ключевые слова:** мониторинг биоразнообразия лесов, дистанционное зондирование, индикаторы разнообразия, экосистемные функции, картографирование, ГИС-технологии.

DOI: 10.15372/SJFS20150502

### ВВЕДЕНИЕ

Леса – наиболее значимые экосистемы для биосферы нашей планеты. Занимая около трети поверхности суши, они синтезируют почти половину всей органической массы Земли и две трети органической массы суши (FAO..., 2012). Обладая максимальной растительной биомассой и биологической продуктивностью, леса служат не только мощным источником органических веществ, но и важнейшим регулятором глобальных биосферных процессов. Как неотъемлемый компонент биоты,

контролирующей около 70 % континентального влагооборота, леса являются поставщиком влаги в атмосферу над сушей. Они играют исключительно важную роль в регуляции водного обмена через поддержание уровня грунтовых вод, пространственное распределение поверхностного стока, эффективное противостояние процессам эрозии и явлениям термокарста. Леса поставляют в биосферу Земли около 60 % кислорода и тем самым обеспечивают кислородный баланс планеты.

Признание глобальной экологической и социально-экономической роли лесов, а также

катастрофических последствий обезлесения для планеты нашло отражение в целом ряде международных документов и программ. Реализованы подобные программы по оценке масштабов изменения лесопокрытой площади на планете на основе анализа временных рядов изображений Landsat в течение периодов 1990–2000 (Kim et al., 2014) и 2000–2012 гг. (Hansen et al., 2013) в виде разработки интерактивных карт высокого разрешения.

Результаты другого глобального проекта выявили изменение лесного покрова на пяти континентах в результате его фрагментированности в течение 35 лет (Haddad et al., 2015). Установлено, что фрагментация среды обитания снижает биоразнообразие от 13 до 75 % и ухудшает ключевые экосистемные функции путем уменьшения биомассы и изменения питательных циклов.

Всем странам-членам ООН рекомендовано разработать координированные подходы к сохранению лесов и устойчивому управлению лесным хозяйством. Это требует глубоких знаний о динамике лесных экосистем, обусловленной биологическими процессами роста и старения древостоев, их повреждением и гибелью в результате естественных и антропогенных воздействий. Исследование этих процессов и разработка соответствующих мероприятий по сохранению лесов – необходимое условие устойчивого лесопользования.

Сохранение и устойчивое управление лесами признаются ключевыми условиями экономического и социального развития человека, защиты окружающей среды и в целом системы поддержания жизни на планете. Особая роль в сохранении и устойчивом управлении лесами принадлежит России, на долю которой приходится 22 % лесного покрова планеты, в том числе более половины бореальных (северных) лесов. В нашей стране леса занимают более 2/3 общей площади земель, а лесистость ее территории (более 45 %) – одна из самых высоких в мире. Покрытая лесом площадь Российской Федерации с середины XX в. остается относительно стабильной, однако деструктивные воздействия антропогенных и природных факторов существенно ухудшают породно-возрастную структуру лесов, вызывают смену коренных типов леса менее устойчивыми и менее ценными, снижают ресурсный и экологический потенциал лесных экосистем.

Для разработки эффективной стратегии управления лесами России в условиях длительного сохранения их биоразнообразия и продуктивности необходимо иметь четкое представление о текущем состоянии лесных территорий с учетом характера и интенсивности ведения лесного хозяйства. Между тем положение с управлением лесами в нашей стране остается крайне напряженным.

В апреле 2013 г. на заседании Государственного совета по лесному комплексу в Улан-Удэ президент Владимир Путин назвал ситуацию с лесами критической и объявил, что лес надо спасать. При этом он поручил подготовить ряд мер по выходу из кризиса, в котором оказалось лесное хозяйство после принятия в 2006 г. Лесного кодекса РФ, существенно изменившего правовое обеспечение лесных отношений в стране. Основные положения этого кодекса направлены на демонополизацию роли государства в управлении лесами и их тотальную приватизацию, что привело к разрушению управленческих структур и системы лесных отношений.

Так, из-за прекращения производства лесостроительства в течение более 10 лет в лесах России не проводилась таксация древостоев, что лишило лесное хозяйство страны необходимой информации о состоянии лесного фонда и возможности планового лесопользования. Ликвидация лесной охраны и лесопожарных служб в системе лесохозяйственных предприятий привела к резкому возрастанию горимости лесов, а ослабление контроля лесопользования способствовало стремительному росту незаконных рубок и ряду других крупных нарушений, обусловленных коррупцией. До сих пор не решены задачи эффективного управления лесами, которое должно основываться на внятном законодательстве, а не на лесном кодексе, искореженном двумя десятками значительно его ухудшивших поправок.

В настоящее время для оценки состояния лесов и контроля их успешного произрастания создается специальная система лесного мониторинга, призванная навести порядок в охране и защите лесных насаждений. Под мониторингом лесов мы понимаем комплексную систему наблюдения за состоянием лесных территорий с целью выявления, анализа и прогноза возможных изменений естественных процессов лесообразования под влиянием

природных и антропогенных факторов. Решение этих задач позволяет расширить представление о концептуальном подходе к системе мониторинга лесов и методических приемах, обеспечивающих возможность сбора, систематизации и обобщения накопленных данных по их состоянию.

Использование космических средств наблюдения Земли является одним из наиболее эффективных и действенных методов получения информации о состоянии наземных экосистем. Эти исследования, начавшиеся с запусков первых ресурсных спутников Земли, развивались по мере роста их инструментария и доступности пользования информацией.

Первые дистанционные исследования лесных экосистем на базе спутниковой информации начали проводить в Красноярске в Институте леса и древесины СО АН СССР в середине 70-х гг. с попыток выявления оптимальных биотопов, благоприятных для массового размножения насекомых-филлофагов в целях контроля их численности и своевременной организации истребительных мероприятий (Исаев, Ряполов, 1976). В то время еще не было должного представления о технических возможностях спутникового мониторинга, открывающихся в связи с новыми технологиями динамического картографирования. Широкое развитие этих работ началось в конце XX и в первом десятилетии XXI в., когда созданные в России и других странах технологии и информационные системы спутникового мониторинга позволили принципиально по-новому оценивать динамику лесного покрова не только на территории одной страны, но и в планетарном масштабе.

Именно в этот период в институтах Российской академии наук – Центре экологии и продуктивности лесов (ЦЭПЛ РАН), Институте космических исследований (ИКИ РАН), Институте леса СО РАН и ряде других научных учреждений – были разработаны уникальные методы и технологии работы со спутниковыми данными, позволяющими решить ряд важных научных задач, а также создать прикладные системы дистанционного мониторинга (Аэрокосмический мониторинг..., 1991). Наиболее продвинутыми в этом направлении оказались работы по развитию дистанционного мониторинга лесов, поскольку лесной покров, традиционно связанный со спектральной аэрофотосъемкой, был для лесоводов-картографов объектом инновационного использования стремительно развивающихся технологий. Одновременно это потребовало большего внимания к объективной оценке состояния лесов не только как источника лесных ресурсов, но и как важнейшего стабилизатора природной среды, что при интенсивном лесопользовании ныне нередко игнорируется в лесных отношениях. В первую очередь здесь имеется в виду важное экологическое и социально-экономическое значение бореальных лесов России как источника биологического разнообразия и хранилища значительной части мирового запаса углерода, эмиссия которого в результате деградации лесных экосистем может существенно повлиять на глобальное изменение климата (Исаев и др., 1995; Исаев, Корвин, 2003).

### **МОНИТОРИНГ РЕСУРСНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСОВ**

Ресурсная и экологическая направленность устойчивого лесопользования, учитывающего сохранение разнообразия видов и структурно-функциональную организацию природных экосистем, чрезвычайно важна при разработке национальной лесной политики. Его неотъемлемой составной частью является наблюдение за состоянием лесных территорий с целью выявления, анализа и прогноза возможных изменений на фоне естественных процессов и под влиянием антропогенных факторов.

В настоящее время бореальные леса подвергаются все большему воздействию антропогенных и природных факторов. Данные спутникового мониторинга лесов и проходящих в них крупномасштабных изменений рассматриваются в качестве важнейшей компоненты информационного обеспечения региональной естественной и антропогенной динамики лесов. Своевременная объективная оценка состояния управляемых бореальных лесов Российской Федерации и разработка подходов к их рациональному использованию должны осуществляться на основе мониторинга лесов и аналитических методов, позволяющих использовать средства дистанционного зондирования и ГИС-технологии, дающие возможность количественной оценки динамики лесного покрова, его ресурсных и экологических параметров и биосферных



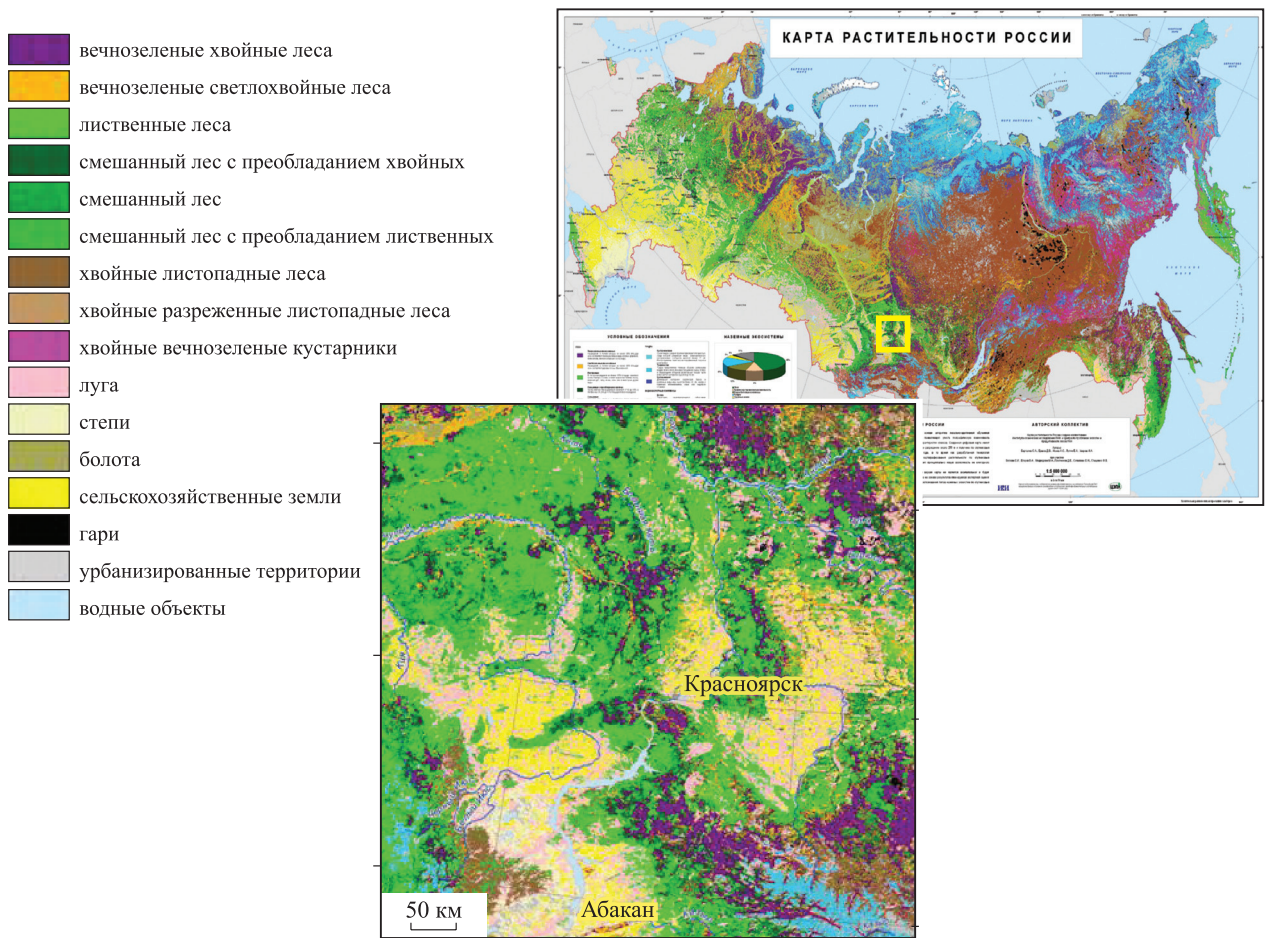


Рис. 1. Карта растительного покрова России TerraNorte RLC по данным MODIS (Барталев и др., 2011а).

функций, определяющих стабильность бюджета углерода (Барталев и др., 1996; Замолотчиков и др., 2007).

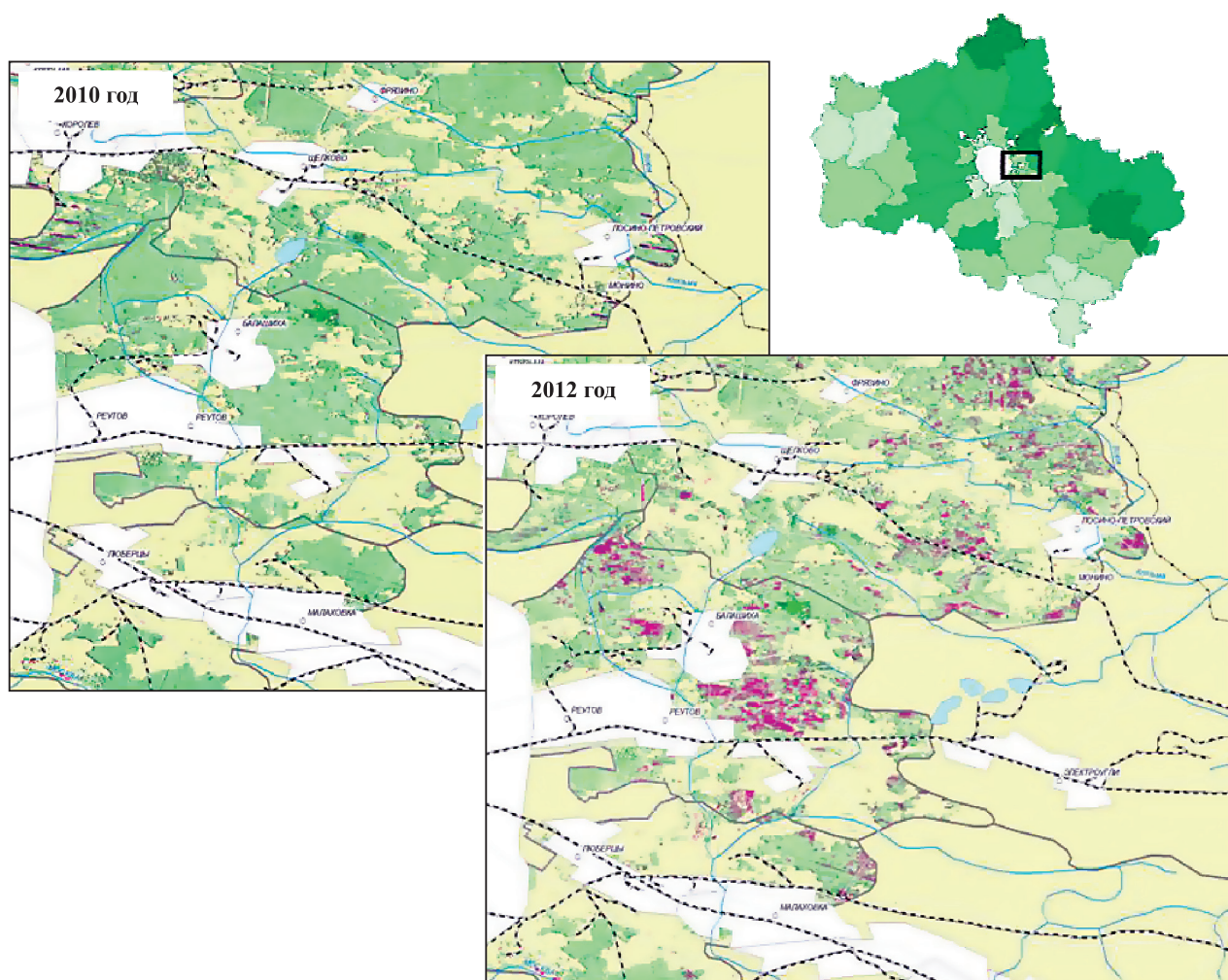
Биоразнообразие является основой большинства *экосистемных функций*. Предусматривается исследование их основных групп: регуляторных (регулирование циклов элементов, почвообразования, водного стока и т. д.), продукционных и формирования местообитаний. Согласно современным представлениям, функционирование экосистем определяется скорее функциональным разнообразием, чем количеством видов, однако функциональное разнообразие и его связи с экосистемными функциями еще недостаточно выявлены. Для экологических оценок выполнения лесными экосистемами той или иной функции предусматривается разработка системы индикаторов (Лукина, 2008; Черненкова, Левицкая, 2013).

Созданные в настоящее время в России технология и информационная система кос-

мического мониторинга лесов уже сейчас открывают принципиально новые возможности ресурсных и экологических оценок лесных экосистем на всей территории страны. Имеющиеся в Российской академии наук технологические разработки, ряд которых уникальные и превосходят известные мировые аналоги, при наличии государственной поддержки могут быть освоены на мировом уровне.

Одним из важнейших результатов, полученных в рамках совместных исследований ИКИ РАН и ЦЭПЛ РАН, является разработка методологии спутникового картографирования растительного покрова, обеспечивающая возможность регулярного получения информации о динамике лесов на любом из пространственных уровней мониторинга: *федеральном, региональном, локальном*. Использование этой методологии позволило создать на основе данных спутникового спектрометра MODIS базовую карту растительного покрова России TerraNorte RLC (рис. 1).





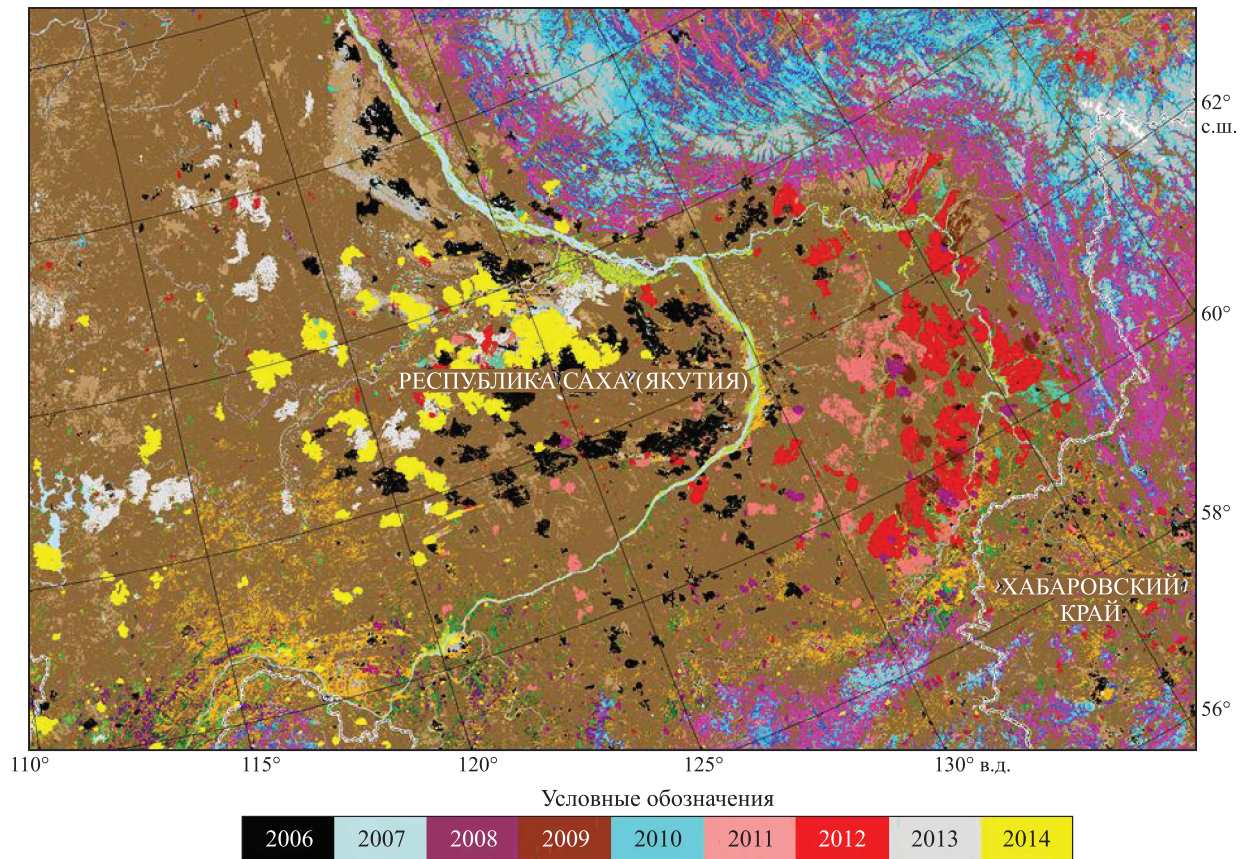
**Рис. 2.** Усыхание хвойных лесов на востоке Московской области с 2010 по 2012 г. (Миртова и др., 2013).

Будучи основанной преимущественно на данных спутниковых наблюдений 2010 г. с пространственным разрешением 250 м, созданная карта является наиболее современным, объективным и детальным источником информации о пространственном распределении растительного покрова по территории России. Легенда карты включает в себя 22 тематических класса, 18 из которых характеризуют различные типы растительности, выделенные с учетом их жизненных форм и фенологической динамики. Разработанный метод и созданная карта TerraNorte RLC составляют основу дальнейшего развития методологии спутникового картографирования растительного покрова (Барталев и др., 2011б). В частности, указанные разработки позволяют создать автоматическую технологию динамического картографирования растительного покрова по данным MODIS и сформировать на

ее основе временную серию ежегодных карт за период с 2000 г. по настоящее время.

Разработанная технология открыла широкие перспективы для использования электронной карты на региональном и федеральном уровнях при выполнении различных государственных задач и международных обязательств по приоритетным направлениям теории и практики лесного хозяйства, в том числе работ по качественной верификации полученных вариантов карты для классификации экосистемного биоразнообразия в целях конкретного приложения в практике лесопользования и лесного хозяйства.

Дистанционными методами могут быть выявлены подробности, определение которых при проведении наземных визуальных осмотров невозможно или которые требуют значительных организационных и финансовых затрат. Спутниковые данные предназначены



**Рис. 3.** Территории, пройденные пожарами в Якутии, по данным MODIS и Landsat-TM/ETM+ (Барталев и др., 2012, 2014).

для контроля природных и антропогенных процессов, протекающих с малой и средней скоростью на значительных площадях, а при крупномасштабной съемке – для фиксации быстро протекающих негативных процессов (вырубки лесов, лесных пожаров, интенсивного повреждения насекомыми, аварийных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, разливов нефти и др.). Дальнейшее развитие мониторинга лесов сопряжено с расширением наших знаний о природе леса, совершенствованием технологических возможностей сбора и обработки информации, улучшением понятийного и математического аппарата наземных и дистанционных исследований.

Характерной чертой лесонтомологического мониторинга является системный подход к анализу динамических процессов, приводящих к нарушению устойчивости лесных экосистем к насекомым-вредителям. Это позволяет правильно оценить биоценологическую роль и хозяйственную значимость отдельных видов и группировок насекомых, оптимизировать существующие методы контроля их

численности, а также разработать принципиально новую систему слежения за изменением состояния лесов, подверженных нападению насекомых с различными типами популяционной динамики. Постоянные наблюдения за состоянием лесных экосистем Московской области дали возможность отслеживать динамику повреждений еловых насаждений короедом-типографом, спровоцированных аномальными погодными условиями 2010 г. (рис. 2).

Дальнейшие исследования направлены на совершенствование методов детектирования и картирования очагов по данным среднего (250 м) и высокого (20–30 м) пространственного разрешения.

Создана система оперативного мониторинга действующих лесных пожаров и повреждений растительного покрова по данным спутниковых систем NOAA-AVHRR, Terra/Aqua-MODIS и SPOT-Vegetation (ИСДМ-Рослесхоз). Указанная система еще 10 лет назад обеспечивала регулярные наблюдения за лесными пожарами и их последствиями на всей территории страны, включая северные районы



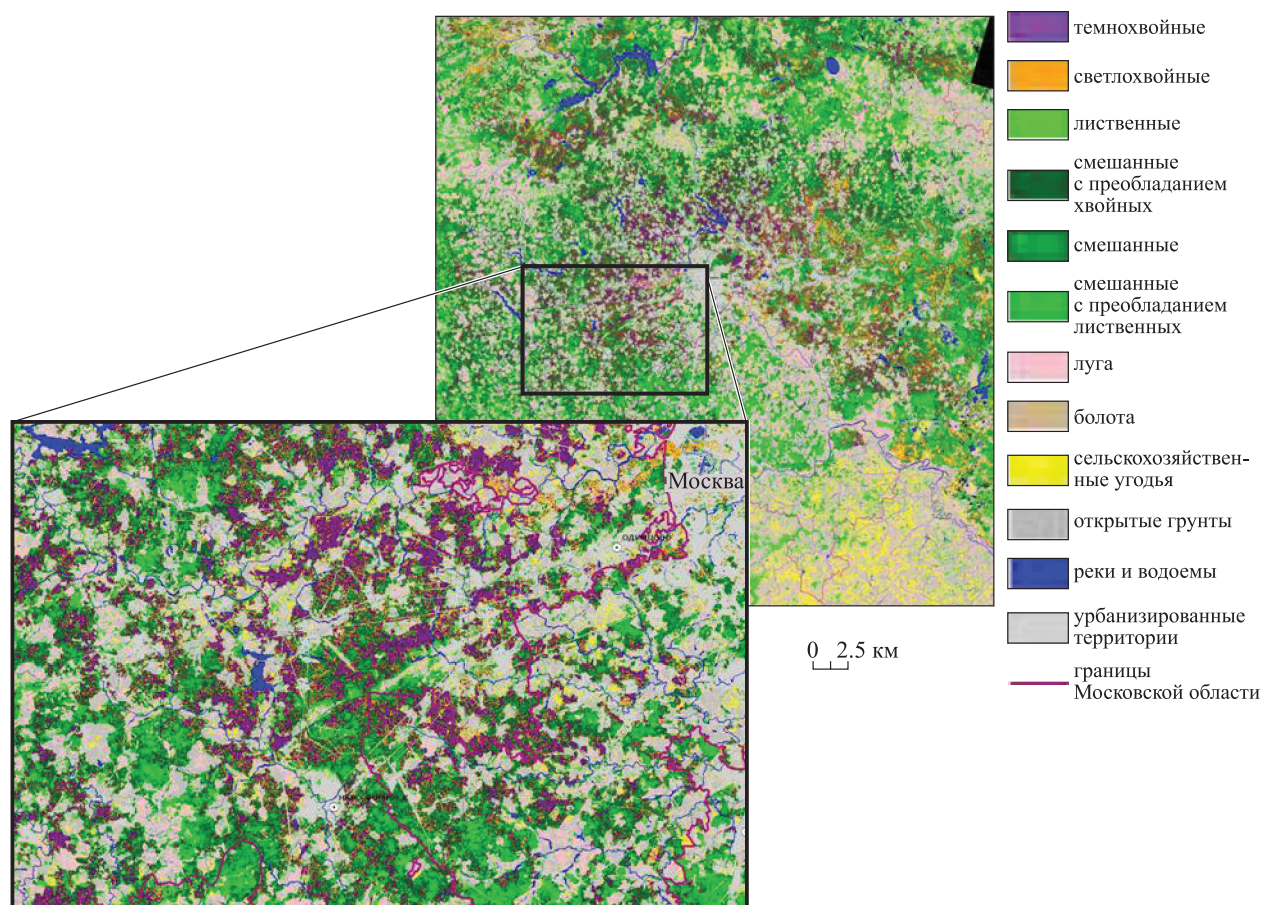


Рис. 4. Карта основных наземных экосистем Московской области по данным космической съемки Landsat-TM (30 м) 2010 г. (Гаврилюк, Ершов, 2012).

ны Сибири и Дальнего Востока (Ершов и др., 2004). Технология начала использоваться для массового уточнения площадей пожаров с 2011 г. и базируется на интерактивном оконтуривании пожаров с использованием специализированных ГИС-инструментов в картографическом web-интерфейсе. Представленная на рис. 3 карта отражает динамику поврежденных пожарами участков по территории Якутии с 2006 по 2014 г.

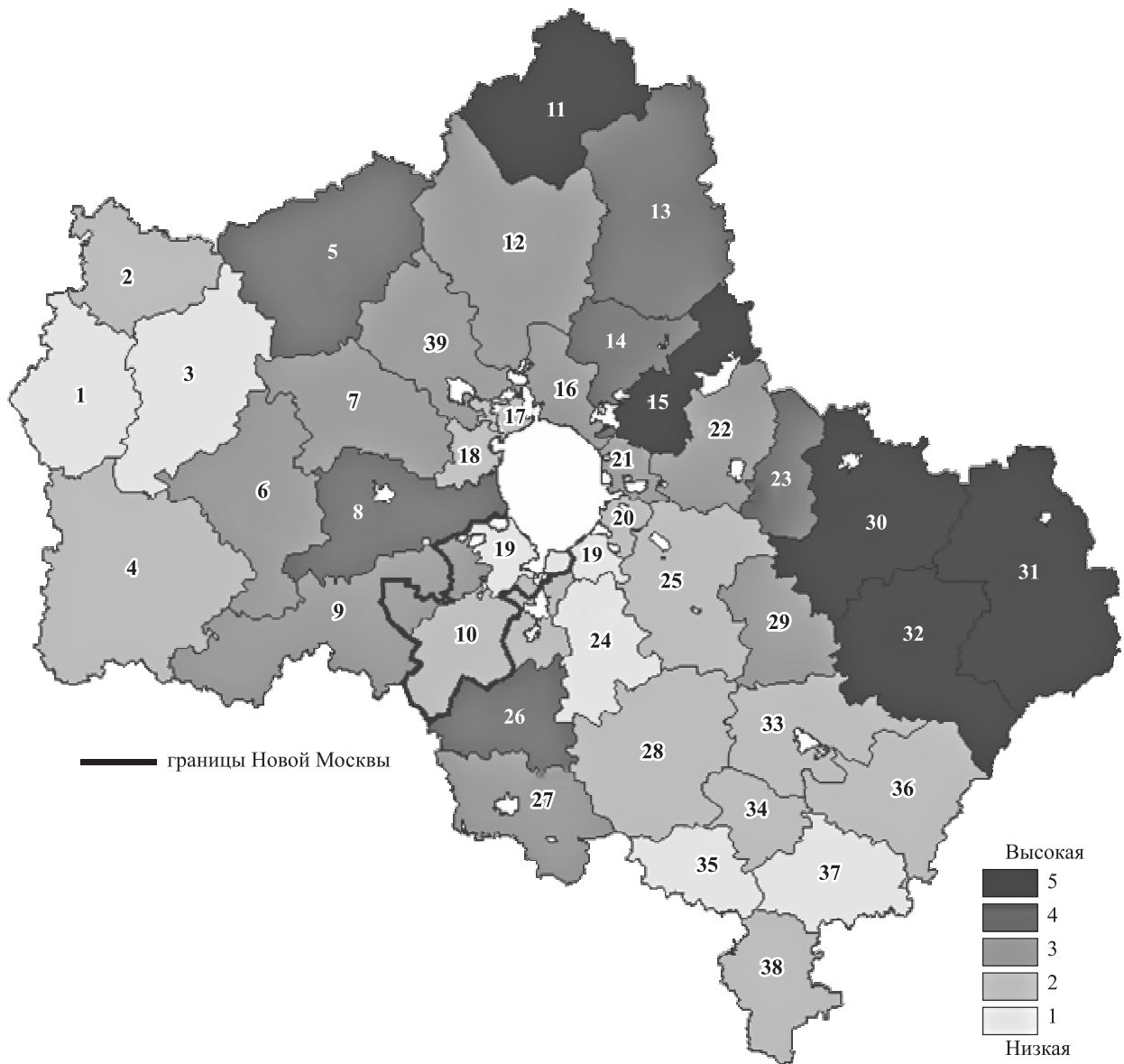
В 2013 г. данная технология позволила в течение пожароопасного сезона провести массовую обработку спутниковых изображений и создать цифровую карту поврежденных пожарами лесов и других типов наземных экосистем для всей территории России. В общей сложности с использованием изображений Landsat удалось уточнить более 80 % площадей, пройденных лесными пожарами на территории России. Построенные карты позволили скорректировать оценку пройденной огнем площади, предварительно полученную на основе оперативного детектирования оча-

гов горения. В итоге построено почти 3.5 тыс. контуров поврежденных участков, соответствующих первоначально выявленным по данным MODIS около 5000 пожарам (Барталев и др., 2014). Полученные результаты дали возможность уточнить зависимость статистической погрешности оперативных оценок площади отдельных пожаров от их абсолютных размеров, а также исследовать сезонную изменчивость возникающих при этом ошибок.

Одним из ощутимых результатов оценки изменения состояния лесов является адаптация существующих методов и алгоритмов обработки спутниковых изображений для воспроизведения карт лесной растительности в пределах политико-административных единиц и природно-территориальных комплексов.

Реализация существующих методов с использованием спутниковых данных высокого пространственного разрешения системы Landsat осуществлена для тематического картографирования состава лесов на территории Московской области (рис. 4).





**Рис. 5.** Комплексная оценка состояния лесных экосистем муниципальных районов Московской области, баллы. Черной линией обозначены новые границы Москвы (Черненкова, Левицкая, 2013).

Муниципальные районы: 1 – Шаховской; 2 – Лотошинский; 3 – Волоколамский; 4 – Можайский; 5 – Клинский; 6 – Рузский; 7 – Истринский; 8 – Одинцовский; 9 – Наро-Фоминский; 10 – Подольский; 11 – Талдомский; 12 – Дмитровский; 13 – Сергиево-Посадский; 14 – Пушкинский; 15 – Щелковский; 16 – Мытищинский; 17 – Химкинский; 18 – Красногорский; 19 – Ленинский; 20 – Люберецкий; 21 – Балашихинский; 22 – Ногинский; 23 – Павлово-Посадский; 24 – Домодедовский; 25 – Раменский; 26 – Чеховский; 27 – Серпуховский; 28 – Ступинский; 29 – Воскресенский; 30 – Орехово-Зуевский; 31 – Шатурский; 32 – Егорьевский; 33 – Коломенский; 34 – Озерский; 35 – Каширский; 36 – Луховицкий; 37 – Зарайский; 38 – Серебряно-Прудский; 39 – Солнечногорский.

Формационный состав лесов по пяти категориям (темно- и светлохвойных, лиственных, с преобладанием хвойных, с преобладанием лиственных) получен при сочетании методов контролируемой и неконтролируемой классификации изображений, что считается перспективным в плане автоматизации процесса тематического картографирования (Гаврилюк, Ершов, 2012).

Подобные и другие тематические карты и связанная с ними информация должны характеризовать разнообразие лесных территорий по определенному спектру особенностей их состояния. Этому также способствовало создание систем индикаторов и параметров, позволяющих выявлять качественные изменения биоразнообразия под влиянием климатических и антропогенных воздействий. В целях

сопоставления данных и стандартизации подходов учитывался опыт международных программ по разработке системы индикаторов и критериев оценки биоразнообразия, масштабов и уровней оценки, вопросов гармонизации форматов данных и их обработки (Ministerial conference..., 1993; The Montreal process, 1995; Indicators..., 1998; Национальный доклад..., 2003).

Разработанная система индикаторов направлена на применение в практике лесного хозяйства и природоохранной деятельности, где ключевым является региональный уровень, рассматриваемый в рамках единиц управления лесами и административного деления, но с обязательным учетом комплексного природного районирования (Исаев и др., 2009).

Для Московской области предложен способ комплексной оценки эффективности индикаторов управления лесами, характеризующих состояние лесного покрова, повреждающие факторы, а также мероприятия по сохранению необходимого уровня биоразнообразия (Черненкова, Левицкая, 2013). В результате по данным официальных и независимых источников (космические снимки систем Landsat и Modis) осуществлена оценка состояния лесного покрова Московской области (лесистость, фрагментарность, доля хвойных и лиственных лесов и др.) (рис. 5), а также проведен расчет зависимости показателей состояния лесов от разного вида нагрузок для муниципальных районов области. Данные характеристики предназначены для использования в устойчивом управлении лесами, в том числе для разработки оптимальных мер по сохранению необходимого уровня биоразнообразия территории.

### **МОНИТОРИНГ ЭКОСИСТЕМНОГО РАЗНООБРАЗИЯ БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСОВ**

Большая протяженность территории России и многообразие ее природных условий (8 природных зон) делает биологическое разнообразие нашей страны уникальным объектом для исследования общих закономерностей распределения, функционирования и эволюции живых систем и обуславливает особое значение отечественных исследований для развития мировой теоретической и при-

кладной биологии. Поэтому сохранение биологического разнообразия лесов в сочетании с их широким хозяйственным использованием рассматривается в качестве важнейшей задачи не только на национальном, но и на мировом уровне.

Сложность организации мониторинга лесов в условиях большого объема имеющихся данных измерения отдельных параметров лесных экосистем обусловлена отсутствием унифицированных методов и универсальных единиц оценки различных аспектов биоразнообразия, а также интеграции таких оценок для экосистем разного пространственного уровня. В этой связи расширились работы по качественной верификации полученных вариантов цифровых карт при проведении классификации экосистемного биоразнообразия, признанного основным индикатором устойчивого управления лесами по критерию биологического разнообразия и приложения его в практику лесного хозяйства. На основе этого индикатора планируется разработка новых методов мониторинга с учетом специфики лесов России и возможного обострения пирологической ситуации в связи с климатическими изменениями в таежных лесах бореальной зоны. В качестве информационной базы для оценки экосистемного разнообразия на национальном уровне рассматриваются данные государственных учетов лесов (лесного реестра), а на региональном – материалы лесоустройства и данные наземных исследований (Мониторинг..., 2008).

Методология мониторинга биоразнообразия лесов базируется на концептуальном подходе, учитывающем пространственно-временную динамику лесообразовательного процесса. Ключевой проблемой в представленном проекте является разработка унифицированных методов и индикаторов для оценки биоразнообразия, а также интеграция таких оценок для биосистем разного пространственного уровня. В связи с этим решен ряд научно-методических задач, обеспечивающих использование имеющихся данных по биоразнообразию лесов в сфере лесной экологии, природопользования и устойчивого управления лесными ресурсами. Опыт изучения биоразнообразия на уровне отдельных популяций, видов и сообществ на примере модельных регионов в европейской части России, в Сибири и на Дальнем

Востоке позволяет перейти к обобщению материалов на уровне территориальных единиц разного масштаба и характеризовать основные тенденции изменения лесных территорий в условиях возрастающего антропогенного воздействия. В разработке методологических подходов мониторинга лесов особый интерес представляет выявление основных стадий восстановительного цикла, позволяющих оценить динамическое разнообразие на отдельных этапах лесообразовательного процесса.

Для исследования биоразнообразия лесных экосистем используются различные методы математического анализа, позволяющие нормировать протекающие процессы и прогнозировать текущие изменения. Для решения задач стратегии природопользования реализована технология сценарного моделирования для учета разных вариантов ограничений лесохозяйственного, экономического и экологического характера. Исследования проведены с целью выявления трендов в породно-возрастной структуре бореальных лесов, разработки моделей естественной и антропогенной динамики лесных экосистем и методов ее долгосрочного прогнозирования при различных режимах охраны, использования и воспроизводства лесных ресурсов. Указанная цель достигается в результате ретроспективного анализа многолетних данных государственных учетов лесов, выявления текущих изменений и тенденций в динамике их породно-возрастной структуры, оценки по данным лесной инвентаризации (лесоустройства) параметров продукционных и сукцессионных процессов в лесных экосистемах, разработки методологии и инструментария для прогнозирования динамики бореальных лесов (Коровин и др., 2012).

Оценка экосистемного разнообразия лесов осуществляется на основе систематизированного представления об их типах. Изучение на большом географическом пространстве разнообразия лесного покрова, обусловленного сопряженным действием разных факторов, тесно связано с проблемой классификации сообществ. Отсутствие единой классификации, большое количество региональных систем, выполненных на различных основаниях, вызывают затруднения как при отнесении описываемых сообществ к синтаксонам определенного ранга, так и при сравнении их между

собой при анализе ботанико-географических связей.

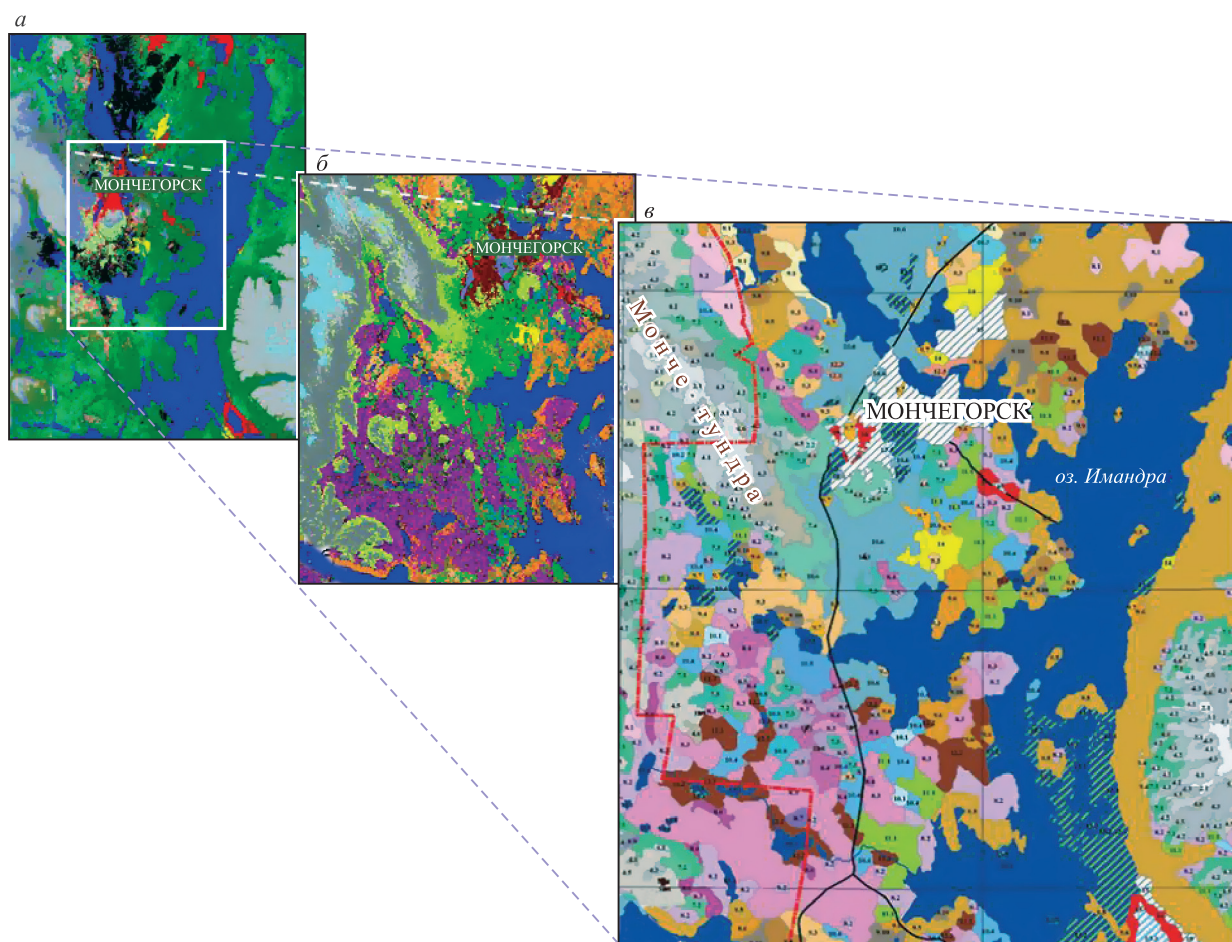
Использование данных дистанционного зондирования (ДДЗ), с одной стороны, расширяет спектр возможностей для отображения пространственной неоднородности растительного покрова, с другой – накладывает дополнительные требования к выделяемым классификационным единицам. Одним из ведущих требований при выделении дешифрируемых классов растительных сообществ по спутниковым изображениям является *однозначность их выявления по признакам самой растительности*.

Выполненная работа позволила на единой методической и методологической основе подойти к изучению современного типологического состава лесов Европейской России. Разработаны принципы выделения унифицированных классификационных единиц на разных уровнях организации растительного покрова, что является одним из условий картографического моделирования (Черненькова и др., 2012, 2015a). Предложенная иерархическая структура легенды, основанная на ведущих принципах отечественной картографической школы, сочетает эколого-фитоценологические типологические единицы разного ранга и эколого-географические критерии.

Применение современных количественных методов ГИС-технологий и анализа ДДЗ и ЦМР для установления генетических, пространственных и временных связей между ценологическим разнообразием и факторами внешней среды позволяет на новой основе подойти к изучению особенностей многомерной пространственной дифференциации лесного покрова. Интерполяция локальных измерений в процессе наземных исследований на верхние масштабные уровни с использованием данных спектральной космической съемки и количественных методов ее обработки дают возможность сохранить важную информацию о структуре и свойствах растительности.

Наличие количественных данных по составу и структуре лесных сообществ разных регионов позволило оценить ценологическое разнообразие, провести сравнительный анализ организации лесов в разных природно-климатических условиях, выявить степень их трансформации и роль разных факторов в дифференциации лесного покрова, связанных





**Рис. 6.** Типологическое разнообразие лесного покрова в окрестностях металлургического производства на картах разного пространственного разрешения (Черенькова и др., 2015б). Дешифрованы: *а* – типы растительного покрова; *б* – классы ассоциаций (группы типов леса); *в* – группы ассоциаций (типы леса).

как с природными особенностями территории, так и с историей ее природопользования.

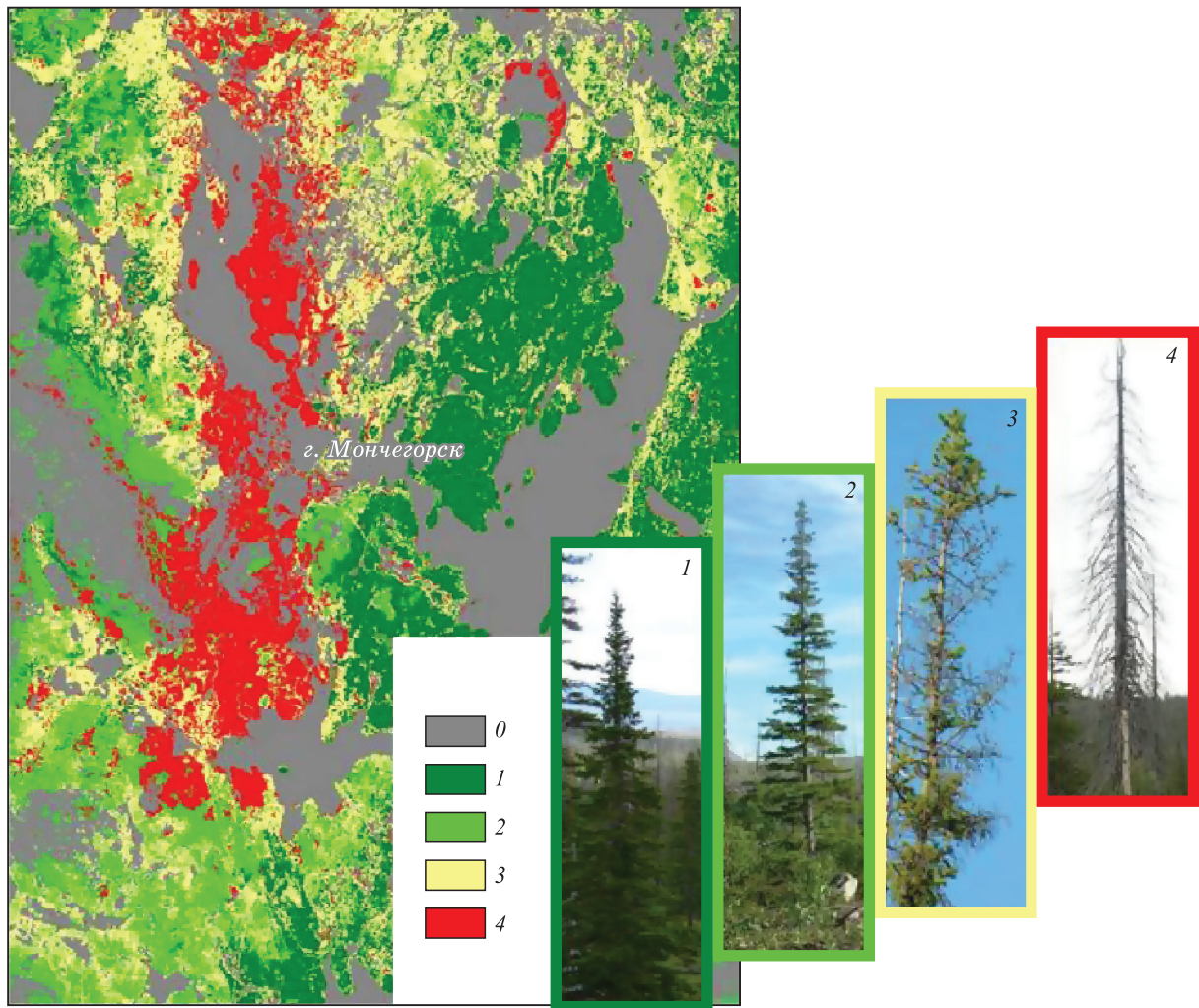
При определении пространственного разнообразия наземного покрова существенным является выбор оптимального набора классов, выявляемых с достаточным уровнем достоверности и соразмерных пространственному масштабу изучаемой территории. На верхнем пространственном уровне мелкомасштабных обзорных карт отображаются типологические единицы в ранге типов растительности, на среднем уровне для федеральных округов – в ранге классов или групп формаций. С понижением уровня и увеличением масштаба картографируемые единицы в ранге групп ассоциаций (или типов леса) с большей подробностью отражают ценотический состав сообществ.

Использование снимков высокого разрешения, данных наземных исследований цифровых моделей рельефа при изучении состояния лесного покрова дало возможность

подготовить разномасштабные цифровые типологические карты лесов ряда модельных регионов с развернутыми легендами. При оценке разнообразия наземного покрова Кольского п-ова верхние классификационные единицы представлены 15 единицами типов наземного покрова (нивально-гляциальный пояс, горные тундры, редколесья, леса, вырубki, гари, болота, поймы, водоемы, техногенные пустоши и другие типы антропогенных земель) (рис. 6, *а*).

На среднем уровне нашли отображение 25 картографируемых единиц, с большей детальностью характеризующих состав еловых, сосновых и березовых лесов (классы ассоциаций или группы типов леса в соответствии с лесной типологией) (рис. 6, *б*).

При разработке крупномасштабной карты выделены 54 картографируемые единицы, и нижними классификационными единицами для лесной растительности были группы



**Рис. 7.** Изменение жизненного состояния древостоя в окрестностях металлургического комбината «Североникель» (5 баллов соответствуют полному усыханию древостоя) (Chernenkova et al., 2013): 0 – нелесные земли (вода, горные тундры); 1 – 1–2.5 балла; 2 – 3 балла; 3 – 3.5–4 балла; 4 – 4.5–5 баллов.

ассоциаций (типы леса), выделенные на основе эколого-ценотической классификации (рис. 6, в) (Puzachenko, Chernenkova, 2012). При классификации типологического разнообразия лесов учитывалась дигрессионная динамика растительных систем, поэтому ряд выделенных классов отражал антропогенную модификацию исходных природных сообществ, находящихся в условиях техногенного загрязнения.

Построение экспертных карт нарушения лесного покрова дает дополнительную информацию при мониторинге последствий разного вида антропогенных воздействий (Chernenkova et al., 2013). Изменение жизненного состояния хвойных деревьев в окрестностях металлургического комбината наглядно демонстрирует размеры дигрессионной ди-

намики лесных экосистем под воздействием аэротехногенных выбросов (рис. 7).

Созданные в процессе анализа крупномасштабные карты региональных частей таежного биома представляют фундаментальную основу для широкого спектра их использования при проведении мониторинга состояния лесов, совершенствования природоохранной деятельности и рационального природопользования. Дальнейшее развитие методов оценки биоразнообразия предполагает выявление значимости различных природных и антропогенных факторов в формировании структуры и динамики лесного покрова.

Эффективность осуществления мониторинга лесов в значительной степени определяется наличием развитой информационной базы о состоянии и динамике лесного фонда,



его экологическом и ресурсном потенциале, а также знаний основных условий развития лесных экосистем. Создание системы мониторинга лесов предполагает обязательную интеграцию потоков информации, в том числе спутниковых данных. В этой связи в ходе реализации первого этапа проекта в ЦЭПЛ РАН разработана схема многоуровневой ГИС биоразнообразия лесных экосистем, обеспечивающая осуществление инвентаризации и оценки природоохранной ценности лесных территорий, что является необходимым этапом для составления кадастров лесов на региональном уровне.

В рамках формирования единой геоинформационной системы «Мониторинг биоразнообразия лесов» создана комплексная база типовых информационных материалов по биоразнообразию лесов России, подготовлены базовые цифровые картографические данные для федерального уровня и по отдельным модельным регионам. Сформирован архив космических снимков среднего и высокого разрешения (150–30 м) на большую часть территории страны за период 1990–2000 гг. Использование ГИС-технологий обеспечило интеграцию и совместный анализ имеющихся данных различного формата и масштаба, характеризующих растительный покров территории.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования биоразнообразия занимают одно из центральных мест в современной мировой биологии, и внимание к ним растет. Укрепляется представление о ключевой роли биоразнообразия в формировании различных экосистем и поддержании устойчивых и благоприятных для человека условий среды на фоне продолжающегося разрушения живой природы Земли.

Международный доклад «Оценка экосистем на пороге тысячелетия» (2005) подтвердил решающее значение биологического разнообразия для обеспечения устойчивого развития и благополучия населения Земли. В 2010 г. на X конференции стран-участниц Конвенции по биологическому разнообразию принят новый стратегический план по сохранению биологического разнообразия до 2020 г.

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, а также другие академические институты лесного профиля имеют большой научный задел, полученный в результате предыдущих исследований биологического разнообразия лесных экосистем России. Эти результаты позволили сосредоточить внимание на наиболее актуальных аспектах динамики биологического разнообразия и решать задачи временной и пространственной оценки современного развития компонентов живой природы в условиях возрастающего антропогенного и природного воздействия, базируясь на использовании спутниковой информации.

Привлечение сотрудников лесных академических институтов позволило получить разнообразную информацию о региональных особенностях биоразнообразия лесных экосистем и возможностях инновационных подходов к их изучению на новой методологической основе, детально изложенной в монографии «Мониторинг биологического разнообразия лесов России» (2008). Результатом завершения следующего этапа исследования биоразнообразия лесных экосистем стала коллективная монография «Разнообразие и динамика лесных экосистем России» (в двух томах – 2012, 2013 гг.), подготовленная в Центре экологии и продуктивности лесов РАН с участием исполнителей из 12 других академических институтов. Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН «Биоразнообразие: закономерности современного развития живой природы» в 2013 г.

В институтах Российской академии наук идет разработка новой государственной стратегии природопользования, учитывающей современные представления о ценности природных ресурсов и задачу перехода страны на инновационный путь развития. Комплекс запланированных исследований в области биоразнообразия лесов является ключевым звеном в формировании научной базы современной концепции природопользования. Он включает широкий спектр работ – от инвентаризации и оценки современного состояния биоразнообразия до разработки технологий его сохранения и устойчивого использования. Эти работы кроме очевидного общетеоретического значения крайне важны с практической точки зрения в качестве основы развития современных принципов и технологий дистан-



ционного спутникового мониторинга и устойчивого использования биоразнообразия лесов с учетом ценности его функций (средообразующих, продукционных и информационных).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аэрокосмический мониторинг лесов / под ред. А. С. Исаева и В. И. Сухих. М.: Наука, 1991. 240 с.
- Барталев С. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Лупян Е. А., Стыценко Ф. В., Флитман Е. В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.
- Барталев С. А., Еришов Д. В., Исаев А. С.* Оценка дефолиации лесов по многоспектральным спутниковым изображениям методом декомпозиции спектральных смесей // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 4. С. 76–86.
- Барталев С. А., Еришов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А., Уваров И. А.* Карта растительного покрова России. М.: ИКИ РАН и ЦЭПЛ РАН, 2011а.
- Барталев С. А., Еришов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А.* Основные задачи и перспективы создание системы глобального спутникового мониторинга лесов // Лесоведение. 2011б. № 6. С. 3–15.
- Барталев С. А., Лупян Е. А., Стыценко Ф. В., Панова О. Ю., Ефремов В. Ю.* Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
- Гаврилюк Е. А., Еришов Д. В.* Методика совместной обработки изображений Landsat-TM и создания на их основе карты наземных экосистем Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 15–23.
- Еришов Д. В., Коровин Г. Н., Лупян Е. А., Мазуров А. А., Тацилин С. А.* Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. Т. 1. С. 47–57.
- Замолодчиков Д. Г., Коровин Г. Н., Гитарский М. Л.* Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2007. № 6. С. 23–24.
- Исаев А. С., Князева С. В., Пузаченко М. Ю., Черненко Т. В.* Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов // Исследование земли из космоса. 2009. № 2. С. 1–12.
- Исаев А. С., Коровин Г. Н.* Крупномасштабные изменения в бореальных лесах Евразии и методы их оценки с использованием космической информации // Лесоведение. 2003. № 2. С. 3–11.
- Исаев А. С., Коровин Г. Н., Сухих В. И., Титов С. П., Уткин А. И., Голуб А. А., Замолодчиков Д. Г., Пряжников А. А.* Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. М.: Центр экологической политики России, 1995. 156 с.
- Исаев А. С., Ряполов В. Я.* Анализ ландшафтно-экологической приуроченности очагов сибирского шелкопряда с применением аэрокосмической съемки // Исследование таежных ландшафтов дистанционными методами. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1976. С. 152–167.
- Коровин Г. Н., Корзухин М. Д., Бутусов О. Б., Голованов А. С.* Долгосрочное прогнозирование динамики породно-возрастной структуры и ресурсного потенциала лесов // Разнообразие и динамика лесных экосистем России / под ред. А. С. Исаева. М.: Тов-во науч. изд. КМК. Т. 1. 2012. С. 53–95.
- Лукина Н. В.* Почвы и разнообразие лесов // Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / под ред. А. С. Исаева. М.: Наука, 2008. С. 70–83.
- Миртова И. А., Еришов Д. В., Мягова Д. А.* Использование спутниковых данных для оценки повреждения лесов короедом-типографом на примере Московской области // ИВУЗ. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 6. С. 77–82.
- Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы / под ред. А. С. Исаева. М.: Наука, 2008. 453 с.

- Национальный доклад Российской Федерации по критериям и индикаторам сохранения и устойчивого управления умеренными и бореальными лесами (Монреальский процесс). М.: ВНИИЛМ, 2003. 84 с.
- Оценка экосистем на пороге тысячелетия, 2005 г. Экосистемы и благосостояние человека: водно-болотные угодья и водные ресурсы. Синтез. Институт мировых ресурсов, Вашингтон округ Колумбия. Доступно по ссылке: [http://www.unwater.org/downloads/MA\\_WetlandsandWater-Russian.pdf](http://www.unwater.org/downloads/MA_WetlandsandWater-Russian.pdf)
- Разнообразие и динамика лесных экосистем России / под ред. А. С. Исаева. М.: Тов-во науч. изд. КМК. Т. 1. 2012. 461 с.; Т. 2. 2013. 478 с.
- Черненкова Т. В., Левицкая Н. Н. Экологическое нормирование качества лесов Московского региона // Бюл. Использование и охрана природных ресурсов в России. 2013. № 1. С. 24–28; продолжение № 2. С. 26–35.
- Черненкова Т. В., Морозова О. В., Пузаченко М. Ю., Попов С. Ю., Беляева Н. Г. Состав и структура еловых лесов юго-западного Подмосковья // Лесоведение. 2015а. № 5. С. 323–328.
- Черненкова Т. В., Пузаченко М. Ю., Басова Е. В., Королева Н. Е. Ценолитическое разнообразие и картографирование растительного покрова центральной части Мурманской области // Геоботаническое картографирование. СПб.: Изд-во СПб. гос. электротехн. ун-та «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2015б. С. 78–94.
- Черненкова Т. В., Пузаченко М. Ю., Морозова О. В., Огуреева Г. Н., Королева Н. Е., Кадетов Н. Г. Подходы к оценке пространственной вариабельности восточно-европейских бореальных лесов на основе наземных и дистанционных данных // Изв. Самарск. науч. центра РАН. 2012. Т. 14. № 1 (6). С. 1652–1655.
- Chernenkova T. V., Puzachenko M. Yu., Koroleva N. E., Basova E. V. Assessment of forest spatial differentiation in Murmansk province using field surveys and remote sensing data // *Contempor. Probl. Ecol.* 2013. V. 6. N. 7. P. 746–754.
- FAO Forestry Paper 169: Global forest land–use change 1990–2005, 14 December 2012. <http://www.fao.org/docrep/017/i3110e/i3110e00.htm>
- Haddad N. M., Brudvig L. A., Clobert J., Davies K. F., Gonzalez A., Holt R. D., Lovejoy T. E., Sexton J. O., Austin M. P., Collins C. D., Cook W. M., Damschen E. I., Ewers R. M., Foster B. L., Jenkins C. N., King A. J., Laurance W. F., Levey D. J., Margules Ch. R., Melbourne B. A., Nicholls A. O., Orrock J. L., Song Dan-Xia, Townshend J. R. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems // *Sci. Adv.* 20 March 2015; 1:e1500052. [http://www4.ncsu.edu/~haddad/Publications/articles/Haddad\\_et\\_al\\_2015\\_SciAdvances.pdf](http://www4.ncsu.edu/~haddad/Publications/articles/Haddad_et_al_2015_SciAdvances.pdf)
- Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-resolution global maps of 21st century forest cover change // *Science*. 15 Nov. 2013. V. 342. N. 6160. P. 850–853. <http://www.sciencemag.org/content/342/6160/850>
- Indicators for forest biodiversity in Europe: Proposal for terms and definitions. Indicators for monitoring and evaluation of forest biodiversity in Europe (BEAR) // *Techn. Rep.* 1998. N. 4. 68 p.
- Kim Do-H., Sexton J. O., Noojipady P., Huang Ch., Anand A., Channan S., Feng M., Townshend J. R. Global, Landsat-based forest cover change from 1990 to 2000 // *Rem. Sens. Environ.* 2014. V. 155. P. 178–193.
- Ministerial conference on the protection of forests in Europe (MCPFE). Sound forestry – sustainable development. Helsinki: Ministry of Agr. and Forest, 1993. 161 p.
- Puzachenko M. Yu., Chernenkova T. V. Assessment of the vegetation cover conditions for the central part of the Murmansk region based on field and remote sensing data // *Geography, Environment, Sustainability.* 2012. N. 3. V. 5. P. 4–13.
- The Montreal process. Criteria and indicators for the conservation and sustainable management of temperate and boreal forests. Hull (Quebec): Canadian Forest Service, 1995. 120 p.

## The Uniqueness of the Contemporary Stage of Forest Remote Sensing in Russia

A. S. Isaev, T. V. Chernenkova

*Centre for Forest Ecology and Production, Russian Academy of Sciences*

*Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow, 117997 Russian Federation*

E-mail: isaev@cepl.rssi.ru, chernenkova50@mail.ru

This paper reflects the planetary role of Russian forests in formation of vegetation biodiversity, providing resource and ecosystem services as well as maintaining human-friendly environment. It depicts the history and framework of biodiversity monitoring of Russian boreal forests on the basis of remote sensing and ground-based data. The framework is based on a conceptual approach of biodiversity investigation taking into account the spatial-temporal dynamic and current forest state. The emphasis is put on the originality of the modern stage of forest cover assessment using remote sensing data – the most important component of information management of regional natural and anthropogenic forest dynamics. The application of advanced quantitative methods of GIS-technologies through analysis of satellite data and digital elevation model (DEM) in order to determine the genetic, spatial and temporal relationships between typological diversity and environmental factors enables to develop a new approach for the study of multidimensional spatial differentiation of forest cover. Local data interpolation during the ground research at upper scale levels using spectral satellite imagery processing and quantitative methods makes it possible to save important information on the structure and vegetation properties. Several examples of forest typological inventory at the federal, regional and local levels are provided. The system of indicators aimed at practical application of forestry and environmental management at the regional level, developed in this paper, helps identify qualitative changes in forest cover under the influence of climatic and anthropogenic factors and develop appropriate measures to maintain the necessary level of forest biodiversity of the territory.

**Keywords:** *monitoring of forest biodiversity, remote sensing, biodiversity indicators, ecosystem functions, mapping, GIS-technologies.*

**How to cite:** *Isaev A. S., Chernenkova T. V. The uniqueness of the contemporary stage of forest remote sensing in Russia // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Siberian Journal of Forest Science). 2015. N. 5: 26–41 (in Russian with English abstract).*