

УДК 630*583

**Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, А. В. Губаев, С. А. Лежнин,
Ю. А. Полевщикова, Е. Н. Демишева**

ЧЕТЫРЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛЕСОВ ПО СНИМКАМ LANDSAT

Проведён обзор основных направлений исследований лесного покрова Земли, проведённых на основе архива серии спутниковых снимков Landsat Геологической службы США. Рассматриваются вопросы применения спутниковых снимков при тематическом картировании лесных насаждений в области оценки их таксационных показателей и состояния древостоев, моделировании биологической продуктивности и выявлении нарушений природного и антропогенного характера. Проводится анализ различных методов дешифрирования разновременных спутниковых серий снимков Landsat и возможности их потенциального применения для долгосрочного мониторинга лесов России на региональном и национальном уровнях. Работа представляет собой систематизацию зарубежных и российских публикаций по изложенным вопросам.

Ключевые слова: спутниковые снимки Landsat; ГИС; дистанционное зондирование Земли; мониторинг лесов; тематическое картирование; лесные насаждения.

Введение. С момента запуска в 1972 году первого американского мультиспектрального сканера MSS (Multispectral Scanner) на борту Landsat 1 и до современных радиометров TIRS (Thermal Infra-Red Sensor) и OLI (Operational Land Imager), работающих на борту спутника Landsat 8, по полученным долговременным наблюдениям было проведено большое количество исследований земной поверхности. База данных с системы спутников Landsat Геологической службы США (USGS Landsat Global Archive), насчитывающая на сегодняшний день около 3 млн. сцен, позволила решить множество важных научно-практических задач в глобальном масштабе. Быстрому признанию в научном сообществе этой

системы спутников способствовали: доступность архивной базы изображений системы Landsat, возможность работы с семью мультиспектральными каналами в видимой и инфракрасной зоне электромагнитного спектра, приемлемый уровень пространственного и временного разрешения, оперативность получения снимков, а также широкий охват исследуемой территории. Результаты исследований учёных, использовавших эти уникальные спутниковые данные, изменили общее представление о нашей планете и деятельности человека. К недостаткам этой базы можно отнести наличие большого числа снимков с облачным покровом, что делает их не всегда приемлемыми при решении отдельных детальных исследований.

© Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Губаев А. В., Лежнин С. А., Полевщикова Ю. А., Демишева Е. Н., 2014.

Ссылка на статью: Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Губаев А. В., Лежнин С. А., Полевщикова Ю. А., Демишева Е. Н. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 1(21). – С. 18-32.

Данные Landsat позволили повысить точность прогнозирования и мониторинга за многочисленными процессами на Земле, поэтому в последние годы наблюдается увеличение спроса на архивную базу данных USGS Landsat. В частности, эти снимки широко используются для оценки и мониторинга за изменениями в атмосфере, поверхности океанов, полярных территорий, сельскохозяйственных земель, городских территорий, пустынь и горных массивов. Изображения с системы спутников Landsat также широко востребованы научными коллективами, занимающимися тематическим картированием и мониторингом растительного покрова.

Целью работы является обзор научных исследований растительного покрова по спутниковым изображениям Landsat и выявление основных научно-практических направлений их применения в мониторинге лесов на региональном и национальном уровнях.

Техника эксперимента и методика исследований. В работе использованы зарубежные и отечественные литературные источники по исследованиям лесных экосистем с использованием данных спутниковой системы Landsat. Большинство из них находится в электронном виде на сайтах научных журналов и базах библиографических данных. В целом были изучены и проанализированы публикации за период с 1980 по 2013 год.

Результаты исследований. Анализ публикаций позволил сделать вывод о том, что все существующие разработки учёных, использующих систему спутников Landsat для изучения лесных насаждений, можно объединить в следующие основные направления: определение таксационных показателей и оценка состояния лесных насаждений, оценка и картирование биомассы (углерода) лесных насаждений, оценка лесовосстановления и зрелых лесом сельскохозяйственных земель, картирование нарушений лесных насаждений. Рассмотрим подробно каждое из этих направлений.

Определение таксационных показателей и оценка состояния лесных насаждений. Большое количество исследований, использующих изображения Landsat, посвящено оценке возможности определения таксационных показателей (возраст, сомкнутость полога, высота деревьев) и дефолиации лесов. Американские учёные W. B. Cohen и T. A. Spies [1], проводившие сравнение пространственных и спектральных характеристик изображений Landsat TM (Thematic mapper) и французского спутника SPOT HRV (High Resolution Visible), пришли к выводу, что несмотря на более высокие пространственные характеристики HRV, снимки TM являются более приемлемыми для оценки ряда таксационных показателей лесов. Ряд работ посвящён возможности дешифрирования таксационных показателей по спектральным характеристикам изображений Landsat. В частности, была проанализирована взаимосвязь между значениями спектральной яркости каналов Landsat ETM+ и таксационными показателями коммерческих посадок сосны ладанной (*Pinus Taeda* L.) в восточной части штата Техас [2]. Для моделирования показателей возраста и густоты насаждений была применена многовариантная регрессия. Линейная комбинация вегетационного индекса NDVI, ETM4/ETM3 (отношение спектральных каналов 3 и 4 радиометра ETM+) и индекса влажности Wetness функции «колпачок с кисточкой» (tasseled cap) (преобразования спектральных значений каналов Landsat в три основных компоненты для картирования растительного покрова) показала наилучшую экстраполяцию возраста насаждения ($R^2 = 78\%$), чем другие комбинации спектральных каналов и соответствующих индексов. Результаты принципиального компонентного анализа (principal component analyses), проведённого для спелого насаждения сосны ладанной (старше 18 лет), показали достоверную информацию о связи между структурой полога древостоя и спектральными значениями, полученными сенсором ETM+.

Другой коллектив учёных [3] исследовал поведение пяти сенсоров (Landsat TM, Landsat TM мультитременной, AVIRIS, ADAR и LiDAR) для оценки показателей лесного насаждения Псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii*). Они пришли к заключению, что использование двух сенсоров (ADAR and AVIRIS) для комбинирования высокого пространственного и спектрального разрешения не существенно улучшает моделируемые показатели насаждения

Для оценки дефолиации бореальных лесов финские учёные использовали мультиспектральные снимки, панхроматические снимки аэрофотосъёмки и данные национальной базы данных лесной инвентаризации [4]. Спутниковые снимки были использованы для выявления спектральных характеристик полога лесов, снимки аэрофотосъёмки для выявления текстуры полога, а данные пробных площадей национальной инвентаризации в качестве контрольных при оценке дефолиации. В работе применена классификация методом оценки взвешенных расстояний ближайшего соседа (KNN). Значения степени дефолиации были получены в виде функции расстояний между спектральными и текстурными откликами пикселей на изучаемом участке и пикселями, относящимися к независимым полевым данным. На уровне пробных площадей точность классификации для трёх классов дефолиации (без дефолиации, слабая и сильная) составила 56 % (коэффициент Каппа). Наиболее полезными характеристиками для изучения дефолиации явились 4 и 5 спектральные каналы Landsat TM.

Оценкой дефолиации лесов по спутниковым снимкам Landsat занимались многие другие учёные. В частности, было отмечено, что с увеличением дефолиации лесного полога наблюдается снижение спектральной яркости ближнего инфракрасного канала [5, 6]. Подобное отклонение свидетельствует об изменении физиологического состояния растений и может быть использовано для ранней диа-

гностики патологических изменений растительных покровов [7]. N. J. Lambert и др. (1995) оценили потенциал снимков Landsat TM и регрессию логит-преобразования (logit regression) для выявления нарушений в лесных насаждениях с доминированием ели европейской (*Picea abies* L.) [8]. Для выявления наиболее существенных нарушений самыми значимыми оказались 1,4 и 7 каналы TM, которые также позволили выделить слабые и средние нарушения на изучаемой территории. При этом точность классификации по коэффициенту Каппа составила 56 %. Дефолиацией лесов тсуги канадской (*Tsuga canadensis* L.) (eastern hemlock) с использованием изображений Landsat TM и линейной регрессии занимались D. D. Royale и R. G. Lathrop (1997). Общая точность классификации составила 64 % для четырёх классов, 70 % при использовании трёх классов и 78 % для двух классов дефолиации лесов тсуги [9].

М. Е. Jakubauskas и К. Р. Price (1997) исследовали взаимосвязь между показателями насаждений сосны скрученной широкохвойной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm.) национального парка Йеллоустон и спектральных характеристик Landsat TM [10]. Они пришли к заключению, что характеристики лесных насаждений можно дешифровать по спутниковым данным, а инфракрасный спектральный канал является наиболее информативным при выполнении таких задач. К аналогичному выводу для различных пород и географических условий пришли другие ученые [11–14].

Коэффициент соотношения 4 и 5 спектральных каналов Landsat TM показал тесную корреляцию с возрастом Псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) в районе западных каскадных гор штата Орегон США [15]. Индекс влажности трансформации «жолпачок с кисточкой» (tasseled cap) показал достаточную приемлемость для выделения молодых, спелых и перестойных лесов Тихоокеанского Северо-Запада США. Т. Nilson

и др. (2001) исследовали изменения, вызванные промежуточными рубками в бореальных лесах. Они пришли к выводу, что в таких насаждениях наблюдается увеличение спектральной яркости в красном канале и снижение его значения в ближнем инфракрасном [16].

Оценка и картирование биомассы (углерода) лесных насаждений. Логическим продолжением использования традиционных моделей при расчётах биомассы является их адаптация к данным дистанционного зондирования [17, 18]. В этом направлении существует большое количество исследований, использующих данные Landsat, на примере бореальных, умеренных и тропических поясов. В штате Висконсин (США) были выявлены зависимости между лесной биомассой и вегетационными индексами с помощью спутника Landsat [19]. В Индии разработана карта растительного покрова и биологической продуктивности лесов по данным спутника IRS-1A [20]. Картирование наземной биомассы лесных экосистем провинции Альберта (Канада) проводи-

лось по методу BioSTRUCT (Biomass estimation from stand structure), который основан на совмещении данных полевых пробных площадей с данными спутниковых снимков Landsat ETM+ [21]. В этом исследовании показатели высота и сомкнутость полога моделировались как по изображениям Landsat ETM+, так и полевым данным пробных площадей. Моделирование высоты показало хороший результат ($R^2=0,65$) при использовании 3, 4 и 5 спектральных каналов Landsat ETM+. В то же время сомкнутость полога экстраполировалась для 3, 4 и 7 спектральных каналов с коэффициентом детерминации, равным 0,57. Среднее значение биомассы по результатам исследований составило 4 т га^{-1} , что статистически коррелировалось с полевыми данными. На приведённой тематической карте (рис. 1) распределения биомассы в лесном насаждении провинции Альберта низкие значения представлены вырубками и лесовозобновлением, высокие показатели биомассы характерны для спелых насаждений с высокими значениями высот и сомкнутостью полога.

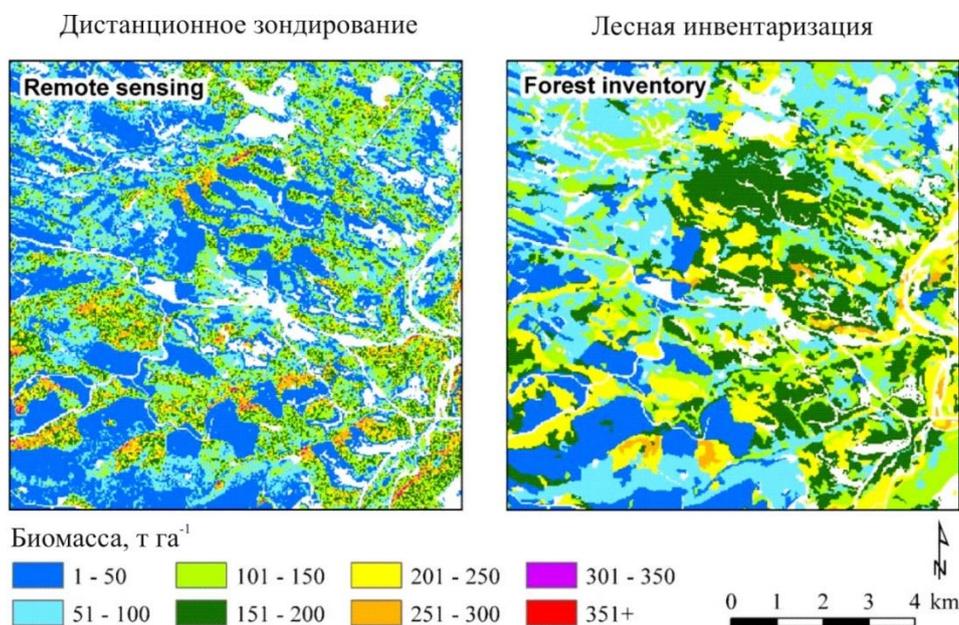


Рис. 1. Сравнение тематических карт биомассы лесов провинции Альберта, полученных по модели BioSTRUCT и данным лесной инвентаризации. На карте Landsat в верхней половине видны свежие вырубки, что подтверждается снижением биомассы (тёмно-синий цвет). В то же время, по данным лесной инвентаризации, в этой части расположены спелые насаждения (тёмно-зелёный цвет) с более высоким содержанием биомассы [21]

Аналогичный подход, основанный на моделировании методом линейной регрессии распределения средних высот лесного насаждения по данным наземной лесной инвентаризации и спектральным характеристикам каналов Landsat TM, был использован для оценки сукцессии в лесах Рондонии Бразилии [22]. Стадии сукцессии классифицировались по пороговым значениям модели методом управляемой классификации «дерево целей». Результаты исследования показали, что три стадии сукцессии (начальная, промежуточная и развитая) могут быть проклассифицированы с 79 % точностью пользователя, что является более высоким показателем в сравнении с методом максимального правдоподобия. На полученной тематической карте различные стадии сукцессии в основном распределены вдоль дорог (рис. 2). Низкие значения биомассы спелых лесов (LMF) наблюдаются в основном на бедных почвах и крутых склонах, которые по площади редко разбросаны среди преобладающих спелых лесов с высокой биомассой (HMF). В работе финских учёных показана методика картирования биомассы лесного покрова посредством комбинирования дан-

ных национальной инвентаризации лесов и спутниковых снимков среднего разрешения IRS-1C и Landsat-TM [23].

Картирование растительного покрова с целью оценки запасов углерода тропических лесов проводилось в различных регионах мира [24–26]. При этом особый интерес у исследователей имеют запас, фитомасса, средний диаметр, высота и возраст лесного насаждения, которые используются в качестве переменных в процессе поиска оптимальных алгоритмов для моделирования биомассы/углерода. Некоторые потенциальные методы для таких исследований, как пошаговый регрессионный анализ, корреляционный анализ и частных наименьших квадратов – Бутстреп алгоритм (Bootstrap Algorithm) широко используются при подборе необходимых переменных (вегетационные индексы, текстура, спектральная яркость и т.п.) в изучаемых моделях [27, 28]. Между тем, несмотря на широкое использование исследователями линейного регрессионного анализа в современных оценках биомассы (углерода) по спутниковым снимкам, получаемые результаты не отличаются высокой точностью [29, 30].

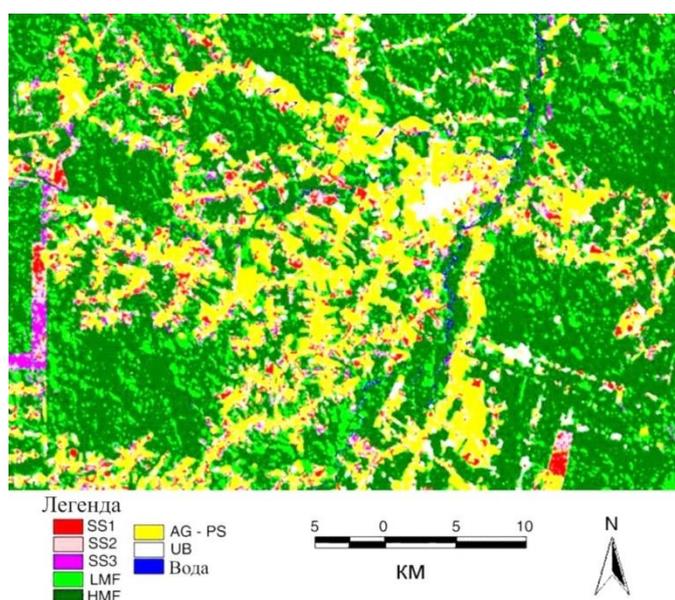


Рис. 2. Тематическая карта классификации сукцессии растительности в лесах Рондонии Бразилии. SS1, SS2 и SS3 представляют начальную, промежуточную и развитую стадии сукцессии леса; LMF и HMF показывают классы спелого леса с низкой и высокой густотой; AG-PS показывают сельскохозяйственные земли и пастбища; UB означает города, дороги и прочие земли

Оценка лесовосстановления и зарастающих лесом сельскохозяйственных земель. Данные дистанционного зондирования Landsat ETM+ были использованы для выявления потенциальных земель для лесовосстановления в Индии [31]. Существующие площади лесов были проклассифицированы с использованием индекса NDVI, в то время как влажность почв определялась на основании распределения индекса влажности почв SWI (Soil Wetness Index). Исследования показали, что от 13 до 23 % земель Индии имеют потенциал для активного лесовосстановления, а 53 % – под зарастание травяной растительностью.

Некоторые исследования зарубежных учёных проведены с целью картирования отдельных деревьев и их групп, произрастающих на сельскохозяйственных землях, по снимкам Landsat и Spot [32]. Методика работ основывалась на комбинации спектрального анализа и сегментации спутникового изображения. В Австралии по разновременным снимкам Landsat ETM+ (1989–2004 гг.) было определено зарастание сельскохозяйственных угодий сорной растительностью [33] на площади 29000 км² равнинных лугов. При картировании расти-

тельного покрова прогнозные модели изменений землепользования в значительной степени зависят от выбора пространственного масштаба [34, 35]. В большинстве случаев в таких работах основным методическим решением является приближение (сопряжение) значений переменных экосистемы с уровня полевых исследований до уровня ландшафта или региона [36–38].

Данные FAO (2011), полученные на основе системы спутников Landsat за 1999–2005 гг., свидетельствуют о том, что в отдельных регионах мира высокими темпами происходит снижение площади лесных земель, вызванное процессами их вырубki и стихийными бедствиями. За период с 1990 по 2000 гг. площадь лесных земель снижалась на 14,2 млн. га год⁻¹, а с 2000 по 2005 гг. это снижение составило 15,2 млн. га год⁻¹ (рис. 3). Сведённые площади лесов были частично восстановлены искусственными лесопосадками и естественным возобновлением. За период 1990–2000 гг. лесовосстановление составило 10,1 млн. га год⁻¹, а за 2000–2005 гг. оно достигло 8,8 млн. га год⁻¹. В результате чистое снижение лесных площадей за 15-тилетний период составило 72,9 млн. га, или примерно 10 га в минуту [39].

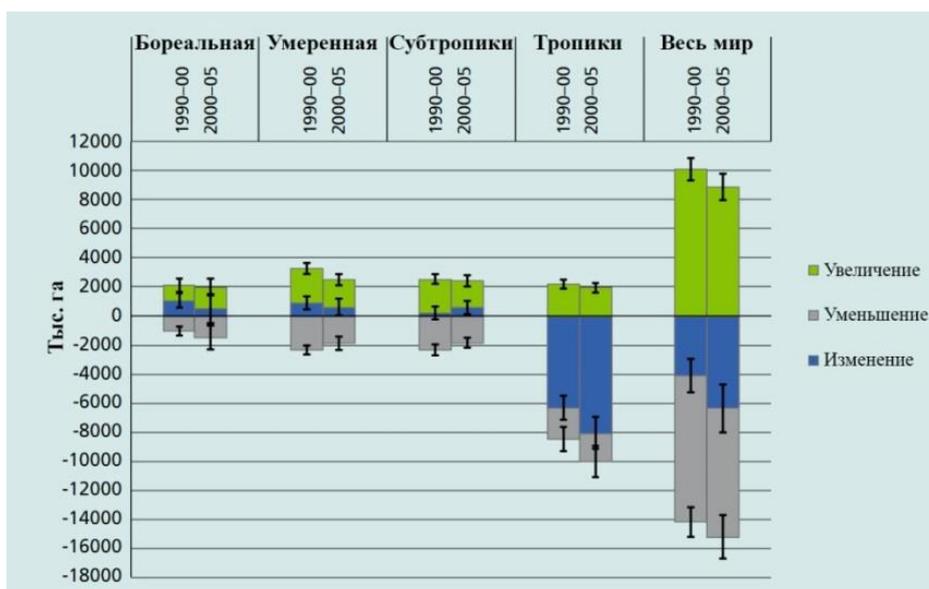


Рис. 3. Изменение площади лесов мира по природно-климатическим зонам (1990–2005 гг.)

Картирование лесных нарушений. В связи с нарушением пространственной структуры лесного фонда, неоднородностью рельефа и труднодоступностью отдельных площадей картирование больших территорий гарей традиционными методами представляет собой сложную задачу. Одним из методов дистанционной оценки площадей гарей и степени повреждения растительного покрова после пожара является использование индексов, полученных с разновременных снимков спутника Landsat. Многочисленные работы в этом направлении подтвердили значимость использования индексов, полученных на основе комбинирования видимого красного и ближнего инфракрасного спектральных каналов. Резкие колебания в сезонном цикле растительности, вызванные засухой и пожарами, часто приводят к аномальным траекториям их роста, что подтверждается мониторингом серии разновременных данных вегетационных индексов. Часто используемым в таких оценках, как с применением единовременных снимков, так и разновременных изображений (до и после пожара), является нормализованный разностный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [40, 41]. Значительно реже при оценках гарей применяются индексы гарей BAI (Burnt Area Index) и почвенный вегетационный SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) [42, 43]. В последние десятилетия при исследовании последствий пожаров на природные экосистемы и выявлении границ гарей широкое применение находит нормализованный индекс гарей (NBR – Normalized Burn Ratio) [44–46]. Большинство исследователей отмечает высокую степень корреляции индексов NBR и NDVI с данными полевых тестовых участков на нарушенных пожарами территориях.

Для территории Марийского лесного Заволжья тематическое картирование, генерализация и векторизация полигонов гарей 1972 и 2010 гг. на разновременных

спутниковых снимках Landsat проводились в ГИС-среде на основе нормализованного вегетационного индекса NDVI и разностного индекса гарей NBR, что позволило исключить субъективность при оценке результатов. Совмещение тематических карт гарей 1972 и 2010 гг. показало, что в определенной степени лесные пожары 2010 года были закономерно отмечены на тех же площадях и в районах Марийского лесного Заволжья, которые пострадали от пожаров в 1972 году [47].

Индекс NBR также используется в практической деятельности лесной службы США для оценки степени повреждения растительных экосистем от лесных пожаров на территории штатов тихоокеанского побережья [48]. Многие исследователи указывают на необходимость проведения долгосрочного мониторинга и разработки технологии по оценке реакции экосистемы на природные нарушения (засухи и пожары) по спутниковым снимкам [49–51].

Карта нарушений (вырубки, пожары) между 1990–2000 гг. для наземных экосистем Северной Америки (США и Канада) была разработана с использованием программы LEDAPS (Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System) и архива спутниковых снимков Landsat [52]. Результаты исследования свидетельствуют о том, что индекс нарушенности, рассчитанный на основе динамики изменений на снимках после преобразования Tasseled Cap («Колпачок с кисточкой»), ежегодно для территории США и Канады составляет 2–3 %.

Анализ научных публикаций по использованию изображений Landsat для решения задач по изучению растительного покрова в различных странах мира показывает высокую перспективность их применения для мониторинга лесов России. Выделенные направления исследований представляют собой обобщение большого числа научных работ, которые также могут быть использованы для решения более де-

тальных задач прикладного характера. Описанные в статье направления исследований на базе спутниковых изображений Landsat могут иметь принципиально новые возможности повышения точности мониторинга и оценок лесного покрова Российской Федерации на региональном и национальном уровне. При этом ретроспектива в исследованиях снимков Landsat позволит глубже понять происходящие процессы изменений в лесном покрове на основе современных положений по динамике биосферы и климата.

Выводы

1. Снимки Landsat являются важным информативным ресурсом для лесоустройства и лесной инвентаризации. Многочисленные исследования свидетельствуют о возможности дешифрирования среднего возраста, высоты и сомкнутости полога лесных насаждений по таким снимкам. Точность классификации при оценках дефолиации лесов может достигать 78 %.

2. Очень широкое применение снимки Landsat нашли в оценках биологической продуктивности и картировании рас-

тительного покрова в различных странах мира. Биомасса (депонированный углерод) успешно вычисляется на основе вегетационных индексов посредством комбинирования данных национальной инвентаризации и спутниковых изображений.

3. По данным зарубежных и отечественных учёных, тематическое картирование бывших сельскохозяйственных земель, зарастающих молодняком леса, может проводиться как на уровне региона, так и отдельных групп деревьев. Разновременные снимки Landsat широко используются ФАО для мониторинга за состоянием процессов лесовозобновления и лесовосстановления в различных регионах мира.

4. При выявлении нарушений (пожары, болезни) в лесном покрове по снимкам спутниковой системы Landsat применяются различные вегетационные индексы. В последние годы учёные при оценках лесных гарей стали применять нормализованный индекс гарей (NBR), позволяющий точно выявлять границы участков, нарушенных пожарами.

Работа выполнена в рамках тематического плана Министерства науки и образования РФ на 2014-2016 гг. «Пространственно-временной анализ состояния лесных экосистем по спутниковым снимкам».

Список литературы

1. Cohen, W.B. Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and Spot imagery / W.B. Cohen, T.A. Spies // Remote Sensing of Environment. – 1992. – № 41 (1). – Pp. 1–17.
2. Sivanpillai, R. Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data / R. Sivanpillai, T.S. Charles, R. Srinivasan, M.G. Messina, X.B. Wu // Forest Ecology and Management. – 2006. – № 223. – Pp. 247–254.
3. Lefsky, M.A. An evaluation of alternate remote sensing products for forestry inventory, monitoring and mapping of Douglas-fir forests in eastern Oregon / M.A. Lefsky, W.B. Cohen, T.A. Spies // Canadian journal of forest research. – 2001. – № 31. – Pp. 78–81.
4. Heikkila, J. Estimating defoliation in boreal coniferous forests by combining Landsat TM, aerial photographs and field data / J. Heikkila, S. Nevalainen, T. Tokola // Forest ecology and Management. – 2002. – № 158. – Pp. 9–23.
5. Brockhaus, J.A. A comparison of Landsat TM and SPOT HRV data for use in the development of forest defoliation models / J.A. Brockhaus, S. Khorram, R.I. Bruck, M.V. Campbell, C. Stallings // International journal of remote sensing. – 1992. – № 13. – Pp. 3235–3240.
6. Ekstrand, S. Assessment of forest damage with Landsat TM: Correction for varying forest stand characteristics / S. Ekstrand // Remote Sensing of Environment. – 1994. – № 47(3). – Pp. 291–302.
7. Шевырногов, А.П. Анализ динамики отражательной способности хвойных и лиственных древостоев на территории Красноярского края по наземным спутниковым измерениям / А.П. Шевырногов, А.Ф. Сидько, М.Ю. Чернецкий, Г.С. Высоцкая // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 2. – С. 71–78.

8. *Lambert, N.J.* Spectral characterization and regression-based classification of forest damage in Norway spruce stands in the Czech Republic using Landsat Thematic Mapper data/ N.J. Lambert, J. Ardo, B.N. Rock, J.E. Vogelmann// International Journal of Remote Sensing. – 1995. – № 16(7). – Pp. 1261-1287.
9. *Royle, D.D.* Monitoring Hemlock Forest Health in New Jersey Using Landsat TM Data and Change Detection Techniques/ D.D. Royle, R.G. Lathrop//Forest Science. – 1997. – № 43. – Pp. 327-335.
10. *Jakubauskas, M.E.* Empirical relationships between structural and spectral factors of Yellowstone Lodgepole pine forests / M.E. Jakubauskas, K.P. Price // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1997. – № 63. – Pp. 1375-1381.
11. *Sivanpillai, R.* Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data/ R. Sivanpillai, T.S. Charles, R. Srinivasan, M.G. Messina, X.B. Wu // Forest Ecology and Management. – 2006. – № 223. – Pp. 247-254.
12. *Терехин, Э.А.* Анализ каналов спутниковых данных Landsat TM для оценки характеристик лесных насаждений лесостепной провинции средне-русской возвышенности / Э.А. Терехин // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 2. – С. 53-62.
13. *Жиринов, В.М.* Сезонная информативность многоспектральных космических снимков высокого разрешения при изучении породно-возрастной динамики лесов / В.М. Жиринов, С.В. Князева, С.П. Эйдлина, Н.В. Зукерт// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – №1. – С. 87-94.
14. *Сочилова, Е.Н.* Анализ определения запасов древесных пород по спутниковым данным Landsat ETM / Е.Н. Сочилова, Д.В. Ершов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – №1. – С. 87-94.
15. *Cohen, W.B.* Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, USA / W.B. Cohen, T.A. Spies, M. Fiorella // International Journal of Remote Sensing. – 1995. – № 16. – Pp. 721-746.
16. *Nilson, T.* Thinning-caused changes in reflectances of ground vegetation in boreal forest / T. Nilson, H. Olsson, J. Anniste, T. Lukk, J. Praks // International Journal of Remote Sensing. – 2001. – № 22. – Pp. 2763-2776.
17. *Курбанов, Э.А.* Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Незамаев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2013. – № 3 (19). – С. 72-82.
18. *Елсаков, В.В.* Спутниковая съемка в оценке продуктивности экосистем Европейского Севера / В.В. Елсаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – № 1. – С. 87-94.
19. *Zheng, D.* Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA / D. Zheng, J. Rademacher, J. Chen, T. Crow, M. Bresee, J. Le Moine, S.R. Ryu // Remote sensing of environment. – 2004. – № 93. – Pp. 402-411.
20. *Tiwari, A.K.* Mapping forest biomass through digital processing of IRS-1A data / A.K. Tiwari // International journal of remote sensing. – 1994. – № 15. – Pp. 1849-1866.
21. *Hall, R.J.* Modelling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume/ R.J. Hall, R.S. Skakun, E.J. Arsenault, B.S. Case // Forest Ecology and Management. – 2006. – № 225. – Pp. 378-390.
22. *Lu, D.* Integration of vegetation inventory data and Landsat TM image for vegetation classification in the western Brazilian Amazon/ D. Lu // Forest Ecology and Management. – 2005. – № 213. – Pp. 369-383.
23. *Tomppo, E.* Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1C WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass / E. Tomppo, M. Nilsson, M. Rosengren, P. Aalto, P. Kennedy // Remote Sensing of Environment. – 2002. – № 82. – Pp. 156 – 171.
24. *Foody, G.M.* Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions / G.M. Foody, S. Doreen, D.S. Boyd, M.E.J. Cutler // Remote sensing of environment. – 2003. – № 85. – P. 463-474.
25. *Zheng, D.* Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA / D. Zheng, J. Rademacher, J. Chen, T. Crow, M. Bresee, J. Le Moine, S.R. Ryu // Remote sensing of environment. – 2004. – № 93. – Pp. 402-411.
26. *Myeong, S.* A temporal analysis of urban forest carbon storage using remote sensing/ S. Myeong, D.J. Nowak, M.J. Duggin // Remote Sensing of Environment. – 2006. – № 101. – Pp. 277-282.
27. *Xiaojun, X.* Estimation of aboveground carbon stock of Moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*) forest with a Landsat Thematic Mapper image / X. Xiaojun, D. Huaqiang, Z. Guomo, G. Hongli, S. Yongjun, Z. Yufeng, F. Weiliang, F. Wenyi // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – № 32(5). – p.1431 – 1448.
28. *Hyypä, J.* Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes / J. Hyypä, H. Hyypä, M. Inkinen, M. Engdahl, S. Linko, Y.H. Zhu // Forest Ecology and Management. – 2000. – № 128. – Pp. 109-120.
29. *Foody, G.M.* Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their trans-

ferability between regions / G.M. Foody, S. Doreen, D.S. Boyd, M.E.J. Cutler // Remote sensing of environment. – 2003. – № 85. – Pp. 463–474.

30. *Labrecque, S.* A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland / S. Labrecque, R.A. Fournier, J.E. Luther, D. Piercey // Forest Ecology and Management journal. – 2006. – № 226. – Pp. 129–144.

31. *Bhagat, V.S.* Use of Landsat ETM+ data for detection of potential areas for afforestation / V.S. Bhagat // International Journal of Remote Sensing // – 2009. – № 30(10). – Pp. 2607 – 2617.

32. *Levin, N.* Mapping forest patches and scattered trees from SPOT images and testing their ecological importance for woodland birds in a fragmented agricultural landscape / N. Levin, C. McAlpine, S. Phinn, B. Price, D. Pullar, R.P. Kavanagh, B.S. Law // International Journal of Remote Sensing. – 2009. – Vol. 30. – № 12. – Pp. 3147–3169.

33. *Lawes, R.A.* Monitoring an invasive perennial at the landscape scale with remote sensing / R.A. Lawes, J.F. Wallace // Ecological Management & Restoration. – 2008. – №9. – Pp. 53–59.

34. *Potapov, P.* Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss/ P. Potapov, M.C. Hansen, S.V. Stehman, T.R. Loveland, K.Pittman // Remote Sensing of Environment. – 2008. – № 112(9). – Pp. 3708–3719.

35. *Курбанов, Э.А.* Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, и др. // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2010. – № 2(9). – С. 14–20.

36. *Cohen, W.B.* An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data / W.B. Cohen, T.K. Maiersperger, S.T. Gower, D.P. Turner // Remote Sensing of Environment. – 2003. – № 84. – Pp. 561–571.

37. *Phillips, R.L.* Scaling-up knowledge of growing-season net ecosystem exchange for long-term assessment of North Dakota grasslands under the Conservation Reserve Program/ R.L. Phillips, O. Beeri // Global Change Biology. – 2008. – №14. – Pp. 1008–1017.

38. *Денисов, С.А.* Проблемы воспроизводства сосновых лесов Среднего Поволжья/ С.А. Денисов, К.К. Калинин, В.П. Бессчетнов, Н.В. Демичева, Т.С. Батухтина, В.В. Самоделкина // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2012. – № 1 (14). – С. 12–23.

39. *FAO, 2011.* Global forest land-use change from 1990 to 2005: initial results from a global remote sensing survey / Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011. – 7 p.

40. *Escuin, S.* Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normal-

ized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images/ S. Escuin, R. Navarro, P. Fernandez // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – № 29. – Pp. 1053–1073.

41. *Барталев, С.А.* Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений / С.А. Барталев, В.А. Егоров, А.М. Крылов, Ф.В. Стыценко, Т.С. Ховратович // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7, №3. – С. 215–225.

42. *Chuvieco, E.* Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination / E. Chuvieco, M.P. Martin, A. Palacios // International Journal of Remote Sensing. – 2002. – № 23. – Pp. 5103–5110.

43. *Wittenberg, L.* Spatial and temporal patterns of vegetation recovery following sequences of forest fires in a Mediterranean landscape Mt Carmel Israel / L. Wittenberg, D. Malkinson, O. Beeri, A. Halutzky, N. Tesler // Catena. – 2007. – № 71. – Pp. 76–83.

44. *Loboda, T.* Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data / T. Loboda, K.J. O'Neal, I. Csiszar // Remote Sensing of the Environment. – 2007. – № 109(4). – Pp. 429–442

45. *Lopez, G.M.J.* Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data / G.M.J. Lopez, V. Caseles // Geocarto International. – 1991. – № 6. – Pp. 31–37.

46. *Key, C.H.* Remote Sensing Measure of Severity: The Normalized Burn Ratio / C.H. Key, N.C. Benson // FIREMON Landscape Assessment (LA)/ - V4 Sampling and Analysis Methods. – 2004. – Pp. LA1–16.

47. *Воробьев, О.Н.* Дистанционный мониторинг лесных гарей в Марийском Заволжье / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2012. – № 1(15). – С. 12–22.

48. *Howard, S.M.* An evaluation of Gap-Filled Landsat SLC-Off imagery for wildland fire burn severity mapping / S.M. Howard, M.L. Lacasse // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2004. – № 70. – Pp. 877–879.

49. *Спивак, Л.Ф.* Мониторинг долговременных изменений растительного покрова аридных и полуаридных зон Казахстана с использованием данных дистанционного зондирования/ Л.Ф. Спивак, И.С. Витковская, А.Г. Терехов, М.Ж. Батырбаева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т.8, № 1. – С. 163–169.

50. *Лузян, Е.А.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») / Е.А. Лузян, И.Ю. Савин, С.А. Барталев, В.А. Толпин, И.В. Балашов, Д.Е. Плотноков // Современ-

ные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т.8, № 1. – С. 190–198.

51. Курбанов, Э.А. Дистанционный мониторинг динамики нарушений лесного покрова, лесовозобновления и лесовосстановления в Марийском Заповье / Э.А. Курбанов, Т.В. Нуреева, О.Н. Воробьев, и др. // Вестник Марийского государственного

технического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2011. – № 3 (13). – С. 17-24.

52. Masek J.G. North American forest disturbance mapped from a decadal Landsat record / J.G. Masek, C. Huang, R. Wolfe, W. Cohen, F. Hall, J. Kutler, P. Nelson. Remote Sensing of Environment. – 2008. – № 112. – P. 2914–2926.

Статья поступила в редакцию 18.11.13.

КУРБАНОВ Эльдар Аликрамович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства, руководитель международного Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3). Область научных интересов – устойчивое управление лесами, дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем, депонирование углерода лесными экосистемами, леса Киото. Автор более 120 научных и учебно-методических работ.

E-mail: kurbanovea@volgatech.net

ВОРОБЬЕВ Олег Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3). Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов, депонирование углерода лесными экосистемами, мониторинг лесных экосистем. Автор более 50 научных и учебно-методических работ.

E-mail: vorobievon@volgatech.net

ГУБАЕВ Александр Владимирович – аспирант кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3). Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор более 20 публикаций.

E-mail: galex@volgatech.net

ЛЕЖНИН Сергей Анатольевич – инженер Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3). Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор более 10 публикаций.

E-mail: lejninsa@volgatech.net

ПОЛЕВЩИКОВА Юлия Александровна – аспирант кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3). Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор более 15 публикаций.

E-mail: polevshikovaya@volgatech.net

ДЕМИШЕВА Екатерина Николаевна – магистрант кафедры лесоводства, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3). Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов, оценка загрязнённых территорий.

E-mail: kls@volgatech.net

KURBANOV Eldar Alikramovich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Chair of Forestry, Head of the Centre of Sustainable Forest Management and Remote Sensing, Volga State University of Technology (3, Pl. Lenina, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation). Research interests – sustainable forest management, remote sensing, biological productivity of forest ecosystems, carbon sequestration by the forest ecosystems, Kyoto forests. The author of more than 120 scientific publications and textbooks.

E-mail: kurbanovea@volgatech.net

VOROBYEV Oleg Nikolayevich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Chair Forestry, Volga State University of Technology (3, Pl. Lenina, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation). Research interests – forest remote sensing, carbon sequestration by the forest ecosystems, forest ecosystems monitoring. The author of more than 50 scientific publications and textbooks.

E-mail: vorobievon@volgatech.net

GUBAYEV Aleksandr Vladimirovich – Graduate student of the forestry department, Volga State University of Technology (3, Pl. Lenina, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation). Research interest – forest remote sensing, biological productivity of forest ecosystems. The author of more than 20 research publications.

E-mail: galex@volgatech.net

LEZHININ Sergey Anatolyevich – Specialist of the Centre of sustainable forest management and remote sensing, Volga State University of Technology (3, Pl. Lenina, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation). Research interest – forest remote sensing, biological productivity of forests. The author of more than 30 publications.

E-mail: lejninsa@volgatech.net

POLEVSHCHIKOVA Yuliya Alexandrovna – Graduate student at the Chair of Forestry, Volga State University of Technology (3, Pl. Lenina, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation). Research interest – remote sensing, biological productivity of forest ecosystems. The author of more than 20 publications.

E-mail: polevshikovaya@volgatech.net

DEMISHEVA Ekaterina Nikolayevna – Master`s Student at the Chair Forestry, Volga State University of Technology (3, Pl. Lenina, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation). Research interest – forest remote sensing, assessment of contaminated and polluted land.

E-mail: kls@volgatech.net

*E. A. Kurbanov, O. N. Vorobyev, A. V. Gubayev,
S. A. Lezhnin, Y. A. Polevshikova, E.N. Demisheva*

FOUR DECADES OF FOREST RESEARCH WITH THE USE OF LANDSAT IMAGES

Key words: *Landsat satellite images; GIS; remote sensing; monitoring of forests; thematic mapping; forest stands.*

ABSTRACT

The paper presents a review of the main research directions of the Earth forest cover based on the use of USGS Landsat Global Archive. The questions of the use of the satellite images for the thematic mapping of forest ecosystems, estimation of their conditions, modeling of biological productivity and detecting of disturbances were examined. The analyses of different methods of detecting multi temporal Landsat images and possibilities of their potential use for the long term monitoring of Russian forests on the regional and national levels were carried out. The research represents systematization of foreign and Russian publications concerning the touched questions. The Landsat images could be used in detecting of the forest characteristics (average age, height, diameter on the breast height and basal area), as well for the forest inventory and management. Several examples of such research publications were discussed in the paper. The defoliation in the forests of the different regions of the world was studied. The thematic mapping of the Landsat images showed that the accuracy assessment of the forest cover classification with such processes varies between 64 and 78%. Important part of the Landsat use is the research on estimation and mapping of biological productivity (carbon) in forest stands all over the world. The vegetation indexes (NDVI, SVI) and dendrometry parameters of the forests are important mechanisms in this respect. Special part of the research activities are dedicated to the estimation of afforestation and reforestation on the abandoned agricultural lands. Meanwhile FAO reports based on the Landsat images assessments show decrease in forest lands due to extensive forest cuttings and catastrophic nature disasters. Recently, estimations of burnt forest areas are based on the wide use of BAI (Burnt Area Index), NBR (Normalized Burn Ratio) and SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index). The research showed high capacity of Landsat archive images for the increasing of accuracy for the monitoring of forest cover in Russian Federation on regional and national levels.

References

1. Cohen W.B., Spies T.A. Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and Spot imagery. *Remote Sensing of Environment*. 1992. No 41 (1). Pp. 1–17.
2. Sivanpillai R., Charles T.S., Srinivasan R., Messina M.G., Wu X.B. Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data. *Forest Ecology and Management*. 2006. No 223. Pp. 247–254.
3. Lefsky M.A., Cohen W.B., Spies T.A. An evaluation of alternate remote sensing products for forestry inventory, monitoring and mapping of Douglas-fir forests in eastern Oregon. *Canadian journal of forest research*. 2001. No 31. Pp. 78–81.
4. Heikkila J. Nevalainen S., Tokola T. Estimating defoliation in boreal coniferous forests by combining Landsat TM, aerial photographs and field data. *Forest ecology and Management*. 2002. No 158. Pp. 9–23.
5. Brockhaus J.A., Khorram S., Bruck R.I., Campbell M.V., Stallings C. A comparison of Landsat TM and SPOT HRV data for use in the development of forest defoliation models. *International journal of remote sensing*. 1992. No 13. Pp. 3235–3240.
6. Ekstrand S. Assessment of forest damage with Landsat TM: Correction for varying forest stand characteristics. *Remote Sensing of Environment*. 1994. No 47(3). Pp. 291–302.
7. Shevyrnogov A.P., Sidko A.F., Chernetskiy M.Yu., Vysotskaya G.S. Analiz dinamiki otrazhatel'noy sposobnosti khvoynykh i listvennykh drevostoev na territorii Krasnoyarskogo kraya po nazemnym sputnikovym izmeneniyam [Analysis of Dynamics of Reflectivity of Softwood and Hardwood Forests at the Krasnoyarsk Territory by Terrestrial Satellite Observations]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Exploration from Space]*. 2006. No 2. Pp. 71–78.
8. Lambert N.J., Ardo J., Rock B.N., Vogelmann J.E. Spectral characterization and regression-based classification of forest damage in Norway spruce stands in the Czech Republic using Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*. 1995. No 16(7). Pp. 1261–1287.
9. Royle D.D., Lathrop R.G. Monitoring Hemlock Forest Health in New Jersey Using Landsat TM Data and Change Detection Techniques. *Forest Science*. 1997. No 43. Pp. 327–335.
10. Jakubauskas M.E., Price K.P. Empirical relationships between structural and spectral factors of Yellowstone Lodgepole pine forests. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1997. No 63. Pp. 1375–1381.
11. Sivanpillai R. Charles T.S., Srinivasan R., Messina M.G., Wu X.B. Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data. *Forest Ecology and Management*. 2006. No 223. Pp. 247–254.
12. Terekhin E.A. Analiz kanalov sputnikovyykh dannyykh Landsat TM dlya otsenki kharakteristik lesnykh nasazhdeniy lesostepnoy provintsii srednerusskoy vozvyshennosti [Analysis of Channels of Landsat TM Satellite Data for Assessment of Characteristics of Plantations in Forest-Steppe Region in Central Russian Upland]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Exploration from Space]*. 2012. No 2. Pp. 53–62.
13. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P., Zukert N.V. Sezonnaya informativnost mnogospes-tralnykh kosmicheskikh snimkov vysokogo razresheniya pri izuchenii porodno-voznrastnoy dinamiki lesov [Seasonal Information Content of Multispectral Space Images of High Resolution under Study of Species-Age Dynamics of Forests]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Earth Remote Sounding from Space]*. 2012. No 1. Pp. 87–94.
14. Sochilova E.N., Ershov D.V. Analiz opredele-niya zapasov drevesnykh porod po sputnikovym dannym Landsat ETM [Analysis of Estimate of Volume of Woody Species by Landsat ETM Satellite Data]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Earth Remote Sounding from Space]*. 2012. No 1. Pp. 87–94.
15. Cohen W.B., Spies T.A., Fiorella M. Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, USA. *International Journal of Remote Sensing*. 1995. No 16. Pp. 721–746.
16. Nilson T., Olsson H., Anniste J., Lukk T., Praks J. Thinning-caused changes in reflectances of ground vegetation in boreal forest. *International Journal of Remote Sensing*. 2001. No 22. Pp. 2763–2776.
17. Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Nezamaev S.A., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A. Tematicheskoe kartirovanie i stratifikatsiya lesov Mariyskogo Zavolzya po sputnikovym snimkam Landsat [Thematic Mapping and Stratification of Mari Forests by Landsat Satellite Data]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Les. Ecologiya. Prirodopolzovanie. [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]*. 2013. No 3 (19). P. 72–82.
18. Elsakov V.V. Sputnikovaya semka v otsenke produktivnosti ekosistem Evropeyskogo Severa [Satellite Observations Ecosystems Productivity Assessment in the North of Russia]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Earth Remote Sounding from Space]*. 2012. No 1. Pp. 87–94.
19. Zheng D., Rademacher J., Chen J., Crow T., Bresee M., Moine J. Le, Ryu S.R. Estimating above-ground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote sensing of environment*. 2004. No 93. Pp. 402–411.

20. Tiwari A.K. Mapping forest biomass through digital processing of IRS-1A data. *International journal of remote sensing*. 1994. No 15. Pp. 1849–1866.
21. Hall R.J., Skakun R.S., Arsenault E.J., Case B.S. Modelling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management*. 2006. No 225. Pp. 378–390.
22. Lu D. Integration of vegetation inventory data and Landsat TM image for vegetation classification in the western Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*. 2005. No 213. Pp. 369–383.
23. Tomppo E., Nilsson M., Rosengren M., Aalto P., Kennedy P. Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1C WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass. *Remote Sensing of Environment*. 2002. No 82. Pp. 156–171.
24. Foody G.M., Doreen S., Boyd D.S., Cutler M.E.J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote sensing of environment*. 2003. No 85. Pp. 463–474.
25. Zheng D., Rademacher J., Chen J., Crow T., Bresee M., Moine J. Le, Ryu S.R. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote sensing of environment*. 2004. No 93. Pp. 402–411.
26. Myeong S., Nowak D.J., Duggin M.J. A temporal analysis of urban forest carbon storage using remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 2006. No 101. Pp. 277–282.
27. Xiaojun X., Huaqiang D., Guomo Z., Hongli G., Yongjun S., Yufeng Z., Weiliang F., Wenyi F. Estimation of aboveground carbon stock of Moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*) forest with a Landsat Thematic Mapper image. *International Journal of Remote Sensing*. 2011. No 32(5). Pp. 1431–1448.
28. Hyypya J., Hyypya H., Inkinen M., Engdahl M., Linko S., Zhu Y.H. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management*. 2000. No 128. Pp. 109–120.
29. Foody G.M., Doreen S., Boyd D.S., Cutler M.E.J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote sensing of environment*. 2003. No 85. Pp. 463–474.
30. Labrecque S., Fournier R.A., Luther J.E., Piercey D. A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland. *Forest Ecology and Management journal*. 2006. No 226. Pp. 129–144.
31. Bhagat, V.S. Use of Landsat ETM+ data for detection of potential areas for afforestation. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. No 30(10). Pp. 2607–2617.
32. Levin N., McAlpine C., Phinn S., Price B., Pullar D., Kavanagh R.P., Law B.S. Mapping forest patches and scattered trees from SPOT images and testing their ecological importance for woodland birds in a fragmented agricultural landscape. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30. No 12. Pp. 3147–3169.
33. Lawes R.A., Wallace J.F. Monitoring an invasive perennial at the landscape scale with remote sensing. *Ecological Management & Restoration*. 2008. No 9. Pp. 53–59.
34. Potapov P., Hansen M.C., Stehman S.V., Loveland T.R., Pittman K. Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss. *Remote Sensing of Environment*. 2008. No 112(9). Pp. 3708–3719.
35. Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Gubaev A.V. Otsenka zarastaniya zemel zapasa Respubliki Mariy El lesnoy rastitelnostu po sputnikovym snimkam [Assessment of Reserve Lands Overgrowing in Mari Republic by Forest Vegetation by Satellite Images]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Les. Ecologiya. Prirodopolzovanie* [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2010. No 2(9). Pp. 14–20.
36. Cohen W.B., Maier sperger T.K., Gower S.T., Turner D.P. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*. 2003. No 84. Pp. 561–571.
37. Phillips R.L., Beerli O. Scaling-up knowledge of growing-season net ecosystem exchange for long-term assessment of North Dakota grasslands under the Conservation Reserve Program. *Global Change Biology*. 2008. No 14. Pp. 1008–1017.
38. Denisov S.A., Kalinin K.K., Besschetnov V.P., Demicheva N.V., Batukhtina T.S., Samodelkina V.V. Problemy vosproizvodstva osnovnykh lesov Srednego Povolz'ya [Problems of Pine Forests Reproduction in the Middle Volga]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Les. Ecologiya. Prirodopolzovanie* [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]. 2012. No 1. Pp. 12–23.
39. FAO, 2011. Global forest land-use change from 1990 to 2005: initial results from a global remote sensing survey. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011. 7 p.
40. Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*. 2008. No 29. Pp. 1053–1073.
41. Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stytsenko F.V., Khovratovich T.S. Issledovanie vozmozhnostey otsenki sostoyaniya povrezhdennykh pozharami lesov po dannym mnogospetralnykh sput-

- nikovykh izmereniy [Study of Estimability of Destroyed Forests by Fires by the Data of Multispectral Satellite Observations]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Earth Remote Sounding from Space]*. 2010. No3. Pp. 215-225.
42. Chuvieco E., Martin M.P., Palacios A. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*. 2002. No 23. Pp. 5103–5110.
43. Wittenberg L., Malkinson D., Beer O., Halutz A., Tesler N. Spatial and temporal patterns of vegetation recovery following sequences of forest fires in a Mediterranean landscape Mt Carmel Israel. *Catena*. 2007. No 71. Pp. 76–83.
44. Loboda T., O'Neal K.J., Csiszar I. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data. *Remote Sensing of the Environment*. 2007. No 109(4). Pp. 429-442.
45. Lopez G.M.J., Caseles V. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. *Geocarto International*. 1991. No 6. Pp. 31-37.
46. Key C.H., Benson N.C. Remote Sensing Measure of Severity: The Normalized Burn Ratio. *FIREMON Landscape Assessment (LA). V4 Sampling and Analysis Methods*. 2004. Pp. LA1-16.
47. Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V. Distantionnyy monitoring lesnykh garey v Mariyskom Zavolzh'e [Remote Monitoring of Forest Burns in Mari Forests]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Les. Ecologiya. Prirodopolzovanie [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]*. 2012. No 1(15). Pp. 12-22.
48. Howard S.M., Lacasse M.L. An evaluation of Gap-Filled Landsat SLC-Off imagery for wildland fire burn severity mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2004. No 70. Pp. 877–879.
49. Spivak L.F., Vitkovskaya I.S., Terekhov A.G., Batyrbaeva M.Zh. Monitoring dolgovremennykh izmeneniy rastitelnogo pokrova aridnykh i poluaridnykh zon Kazakhstana s ispolzovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya [Monitoring of Long-Term Changes of Vegetation Cover of Arid and Semi-Arid Zones in Kazakhstan with the Use of Remote Sensing Data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Earth Remote Sounding from Space]*. 2011. Vol.8, No 1. Pp. 163-169.
50. Lupyay E.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Balashov I.V., Plotnikov D.E. Sputnikovyy servis monitoring sostoyaniya rastitelnosti («Vega») [Satellite Service Monitoring of Vegetation Condition («Vega»)]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Earth Remote Sounding from Space]*. 2011. Vol. 8. No 1. Pp. 190-198.
51. Kurbanov E.A., Nureeva T.V., Vorobyev O.N. Distantionnyy monitoring dinamiki narusheniy lesnogo pokrova, lesovozobnovleniya i lesovostanovleniya v Mariyskom Zavolzh'e [Remote Monitoring of Dynamics of Break of Forest Cover, Forest Restoration and Forest Regeneration in Mari Region]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Les. Ecologiya. Prirodopolzovanie [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management]*. 2011. No 3 (13). Pp. 17-24.
52. Masek J.G., Huang C., Wolfe R., Cohen W., Hall F., Kutler J., Nelson P. North American forest disturbance mapped from a decadal Landsat record. *Remote Sensing of Environment*. 2008. No 112. Pp. 2914 – 2926.