

УДК630*581/584:630*23

*Э. А. Курбанов, Т. В. Нуреева, О. Н. Воробьев, А. В. Губаев,
С. А. Лежнин, Т. Ф. Мифтахов, С. А. Незамаев, Ю. А. Полевщикова*

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ДИНАМИКИ НАРУШЕНИЙ ЛЕСНОГО ПОКРОВА, ЛЕСОВОЗОБНОВЛЕНИЯ И ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ В МАРИЙСКОМ ЗАВОЛЖЬЕ

Рассмотрены вопросы использования разновременных спутниковых снимков среднего разрешения LandsatTM и ETM+ 1985-2010 гг. для исследования мониторинга нарушений лесов, процессов зарастания земель запаса и перераспределения, оценки площадей лесных культур на территории западной части Марийского лесного Заволжья.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, лесные нарушения, земли запаса и перераспределения, геоинформационные системы, спутниковые снимки, лесовосстановление.

Введение. В последние десятилетия во всем мире дистанционный мониторинг за ростом и продуктивностью лесных насаждений является активно развивающейся областью научных исследований. В первую очередь это связано с широкой доступностью для ученых и специалистов спутниковых снимков среднего и высокого разрешений, а также быстро развивающимся рынком программных продуктов по работе с данными дистанционного зондирования.

Большой практический интерес у арендаторов леса и работников лесничеств вызывают тематические карты динамики роста молодняков искусственного и естественного происхождения, сделанные на основе разновременных спутниковых снимков. Такие сведения позволяют оперативно отслеживать происходящие изменения, планировать проведение лесохозяйственных мероприятий по уходу за молодыми насаждениями, а также совершенствовать прогнозы развития лесных ландшафтов и территорий. Особый интерес представляют бывшие сельскохозяйственные угодья (земли запаса и перераспределения), которые после экономических реформ 90-х гг. прошлого века активно зарастают древесно-кустарниковой растительностью, а также процессы воспроизводства на вырубках [1]. Лесовосстановление на вырубках и бывших сельскохозяйственных угодьях является важным процессом с точки зрения влияния молодого лесного покрова на экологические процессы, такие, как эрозия, гидрологический цикл, депонирование углерода, формирование лесной среды.

Использование разновременных спутниковых снимков для мониторинга за землепользованием началось в прошлом веке на основе данных грубого разрешения (AVHRR и MODIS). Но для оценки динамики изменений в лесном фонде более широкое применение нашли снимки спутника Landsat. В США были осуществлены крупные проекты по картированию лесных нарушений и их лесовосстановлению, по результатам которых создана карта изменений на территории 48 штатов с использованием снимков Landsat с 10-летним интервалом [2]. В проекте «Динамика лесов Северной Америки» (NAFD) были исследованы лесные нарушения и лесовосстановление на 23 участках в США на основе ежегодных или двухлетних сцен Landsat [3]. Интересным продолжением этого проекта явилось исследование по методу траектории обнаружения изменений (changedetection) [4]. По этому методу попиксельные спектральные данные на разновременных спутниковых снимках с инте-

рвалом 20 лет сравнивались с известными наземными объектами, пройденными различными видами рубок главного и промежуточного пользования. Было установлено, что пиксели на вырубках имели экспоненциальную форму снижения спектральной яркости с момента вырубки и зарастания ее лесной растительностью. В другом исследовании ученые провели картирование различных участков лесовозобновления на ландшафтном уровне в Западном Орегоне путем использования серии изображений Landsat за 19-летний период [5]. На основе данных лесной инвентаризации и единовременных сцен Landsat была создана регрессионная модель проективного распределения деревьев, которая в дальнейшем была распространена на все 19 изображений Landsat. Для разновременных изображений была использована радиометрическая нормализация на основе псевдоинвариантных характеристик. Траектории лесовозобновления на вырубках были определены для трех групп рубок, а сами изучаемые территории были сгруппированы в четыре класса лесовосстановления с использованием непараметрической классификации.

Исследования, проведенные в Скандинавии, свидетельствуют о том, что посадки лиственных пород на бывших фермерских участках дают высокую продуктивность и имеют существенный потенциал для производства древесной биомассы [6]. Для региона Верхнего Поволжья было установлено, что на начальных стадиях расселения растительности на лугах и залежах участвуют 10-12 видов древесно-кустарниковых пород, основными из которых являются береза, сосна, ива, ольха серая, осина [7].

Целью работы было исследование динамики нарушенности земель лесного фонда, лесных культур и зарастающих лесной растительностью земель запаса и перераспределения Марийского лесного Заволжья за 25-летний период по разновременным спутниковым снимкам Landsat-7 ETM+, для выполнения которой были решены следующие **задачи**:

1) заложены пробные площади (тестовые участки) на территории ГКУ «Юринское» и «Килемарское» лесничества, Учебно-опытного лесхоза ФГБОУ ВПО МарГТУ, а также землях запаса (перераспределения) исследуемого региона для оценки точности создаваемых тематических карт;

2) подобран комплект мультиспектральных спутниковых снимков LandsatTM и ETM+ с 1985 по 2010 гг. на исследуемую территорию, которые были трансформированы в трехканальные изображения (яркость, зелень и влажность) с помощью модуля «TasseledCap» в программном комплексе ENVI-4.8 (рис. 1);

3) на всех исследуемых снимках выделены участки сплошных рубок, лесных пожаров, лесных культур и зарастающих участков земель перераспределения;

4) проведена управляемая классификация снимков для выявления динамики нарушений в лесном фонде, а также оценки площадей лесных культур и зарастающих лесной растительностью земель запаса Марийского Заволжья.

Техника эксперимента и методика исследований. Полевые исследования были проведены с июня по сентябрь 2008-2011 гг. В процессе работы были максимально исследованы густота и сомкнутость крондеревьев древесной растительности на трансектах, заложенных от опушек материнского леса до окончания распространения возобновившегося молодого леса на землях запаса и перераспределения [8].

Географические координаты каждого тестового участка фиксировались с помощью GPS-приёмника GARMIN eTrex. Всего на зарастающих землях запаса и перераспределения было заложено 68 тестовых участков, а в лесных культурах – 25.

Для характеристики роста молодых насаждений был проведен анализ разновременных (мультивременных) снимков LandsatTM и ETM+ (WRS-2, path 172row 21), сделанных в летнее время. Снимки прошли радиометрическую и геометрическую обработку уровня 1G. Для устранения различий на снимках Landsat, сделанных в различные периоды фенологического состояния растительного покрова (май–август), изображения проходили процедуру эмпирического линейного преобразования координат пространства спектральных призна-

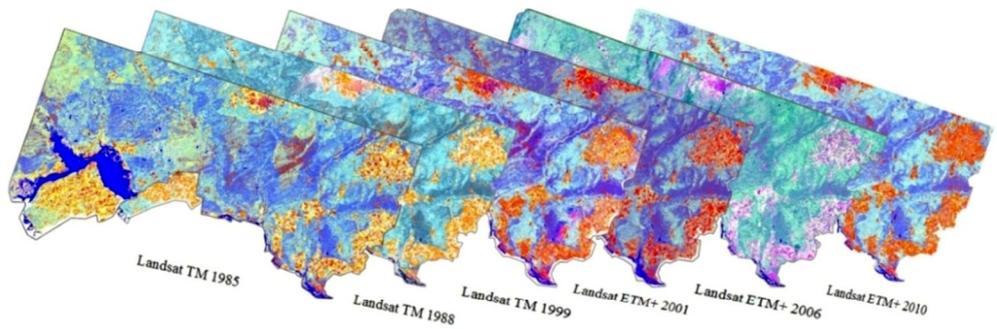


Рис. 1. Серия разновременных спутниковых изображений Landsat 1985-2010 гг.

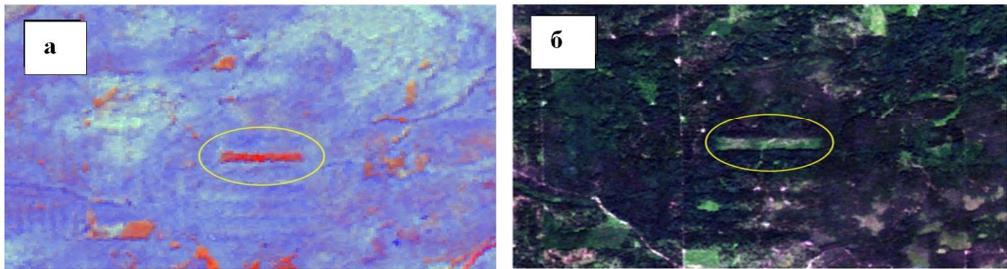


Рис.2. Объект обучающей выборки – сплошная вырубка леса:
а) на снимке Landsat TM 1988 г., б) на снимке Alos 2006 г.

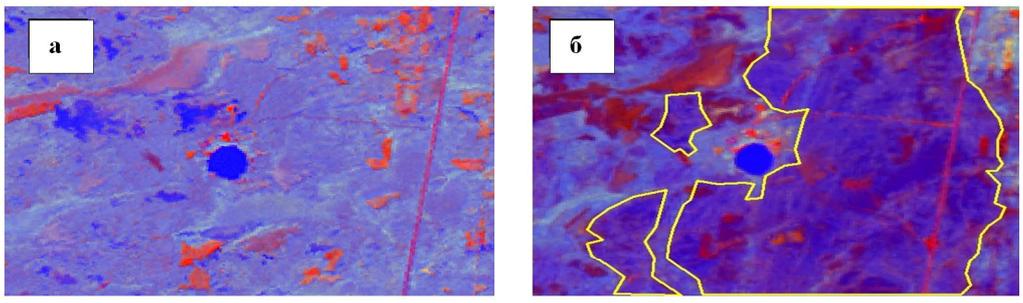


Рис. 3. Объект обучающей выборки (ROI) – лесные пожары: а) на снимке Landsat ETM+ 2001 г. до пожаров, б) на снимке Landsat ETM+ 2010 г. после пожаров

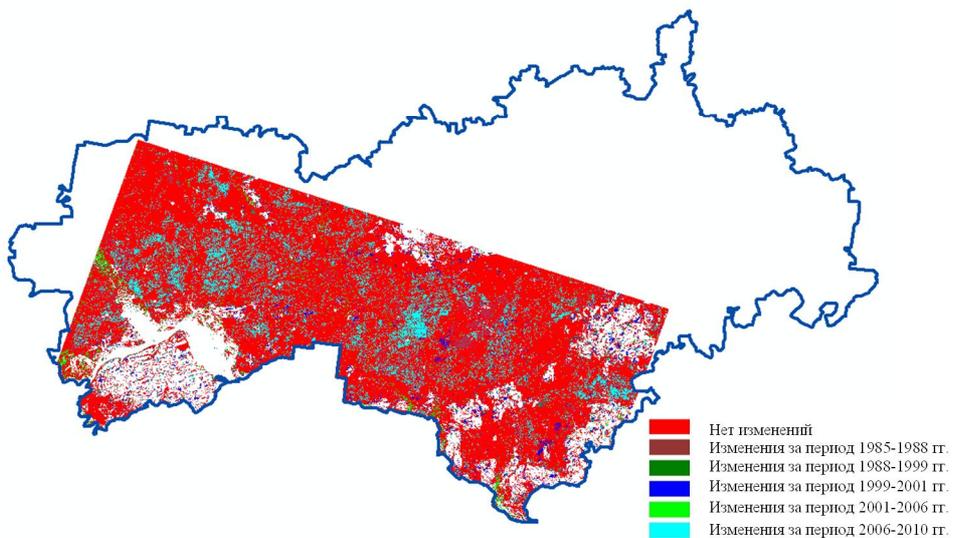


Рис. 4. Тематическая карта нарушенности растительного покрова, выполненная для части территории Марийского Заволжья по шести разновременным спутниковым снимкам Landsat 1985-2010 гг.

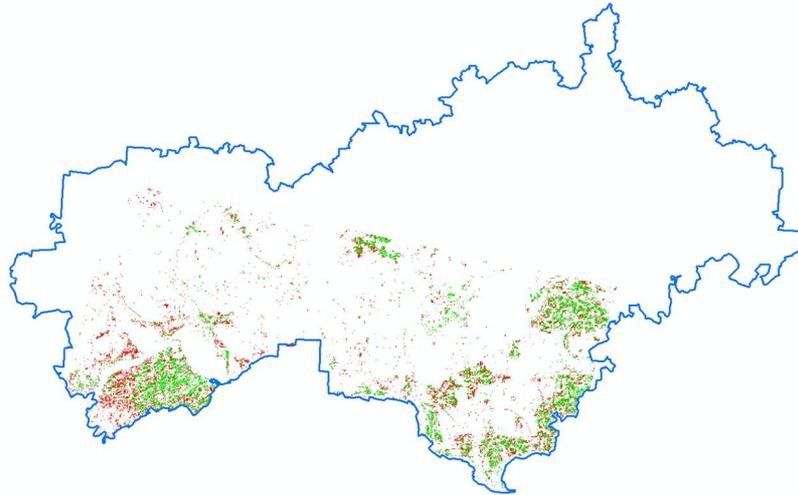


Рис. 5. Тематическая карта зарастания сельскохозяйственных земель древесно-кустарниковой растительностью в Марийском Заволжье между 1985 и 2010 гг. Зеленым цветом показаны площади, на которых не произошли изменения, красный цвет свидетельствует о зарастании земель запаса древесно-кустарниковой растительностью

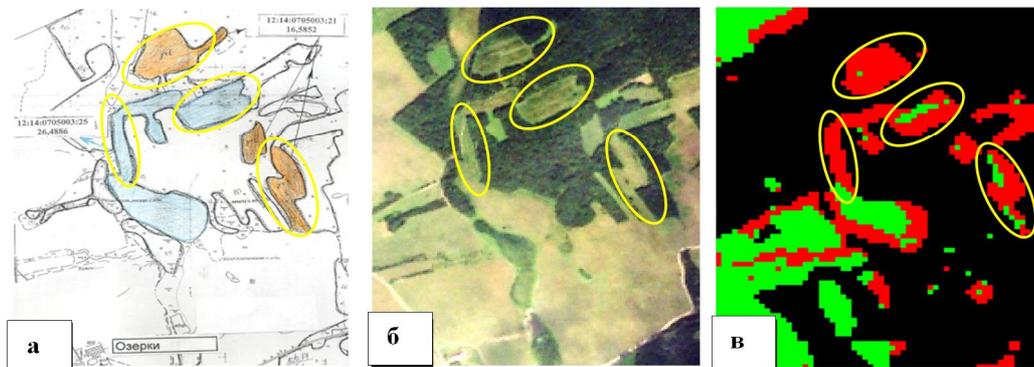


Рис. 6. Зарастающий лесной растительностью участок земель фонда перераспределения, расположенный рядом с селом Озерки Звениговского района РМЭ: а) кадастровый план участка 2011 г., б) зарастание участка лесной растительностью на спутниковом снимке Alos 2009 г., в) этот же участок на тематической карте (красный цвет свидетельствует о зарастании участка молодой лесной растительностью, зеленый цвет – отсутствие изменений)

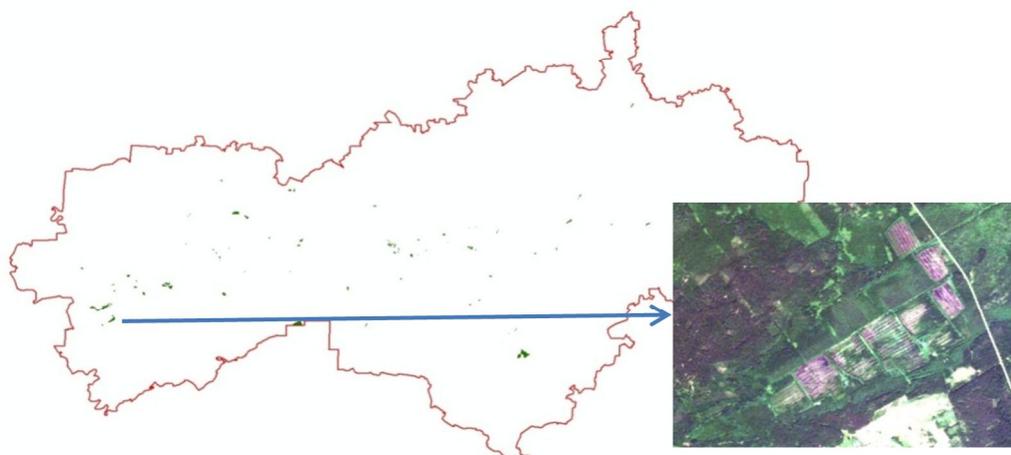


Рис. 7. Тематический слой участков лесных культур (возрастом до 10 лет) на территории Марийского Заволжья на снимке LandsatETM+ 2010 г.

ков *tasseledcap* («колпак с кисточкой»). Этот алгоритм, широко используемый в изучении растительного покрова, позволяет выделять на каждом из мультиспектральных изображений три важные ортогональные координаты – «яркость», «зелень» и «влажность» («brightness», «greenness», «wetness») [9]. В работе мы использовали координаты «яркости» и «зелени» пространства спектральных признаков. Далее на каждый из исследуемых снимков (*tasseledcap*) накладывалась маска слоя «Лес» изучаемого района, состоящая из классов хвойных и лиственных пород. Этот слой-маска был получен путем объединения всех лесных классов карты снимка LandsatETM+ 2001 г. [10].

На каждом разновременном снимке Landsat, начиная с 1988 по 2010 гг., были созданы 70 обучающих выборок (*regionsofinterest*, ROI) на площадях лесных насаждений, которые не были затронуты изменениями (нарушениями). На этих же снимках Landsat экспертной оценкой и сравнением со снимками более высокого разрешения Alos были выделены 60 участков ROI, на которых произошли нарушения (сплошные вырубки и пожары) (рис. 2, 3). На всех разновременных спутниковых снимках Landsat была проведена управляемая классификация методом «максимального правдоподобия» для получения тематической карты изменений в лесном покрове за весь изучаемый период времени.

Такие же обучающие выборки были созданы на снимках Landsat для участков земель запаса и перераспределения. На этих участках были выделены 60 ROI, на которых произошли изменения (зарастание молодой лесной растительностью), и 65 ROI, которые с течением времени остались неизменными. Для проведения валидации вновь созданной тематической карты зарастающих земель запаса использованы кадастровые данные по сельскохозяйственному фонду Министерства государственного имущества РМЭ.

Результаты исследований. Анализируя полученную карту нарушенности лесного покрова части территории Марийского Заволжья (рис. 4), можно отметить, что большое влияние на нее оказали сплошные рубки 1985-1989 гг., когда в полном объеме осваивался весь лесосечный фонд региона исследований. В те годы рубкам были подвержены 50,8 тыс. га лесных насаждений (табл.), расположенные на площади снимка Landsat. С 1989 по 1999 гг. наблюдается значительное снижение рубок главного пользования, что также сказывается на площади нарушенности территории лесного фонда. Больше всего нарушений (121 тыс. га) в исследуемом регионе наблюдается между 2006-2010 гг., что объясняется аномально жаркими погодными условиями на территории Среднего Поволжья и лесными пожарами 2010 года.

Распределение нарушенных площадей (вырубок и лесных пожаров) на тематической карте, полученной по разновременным спутниковым снимкам Landsat, га

нет изменений	1985-1989 гг.	1989-1999 гг.	1999-2001 гг.	2001-2006 гг.	2006-2010 гг.
791855,1	50821,3	18381,9	24991,8	15696,4	121241,5

Вновь полученная тематическая карта (слой) динамики изменений земель запаса и перераспределения позволила провести оценку их зарастания древесно-кустарниковой растительностью (рис. 5). Было установлено, что зарастание растительностью наблюдается на площади 45 тыс. га, что составляет 46 % от всей территории исследуемых земель запаса и перераспределения (95,8 тыс. га). Это свидетельствует об устойчивом процессе захвата брошенных сельскохозяйственных земель древесной растительностью.

Валидация полученных данных по зарастающим сельскохозяйственным угодьям (землям запаса и перераспределения) показала высокую степень достоверности тематической карты и ее соответствие полевым данным. Натурное обследование участков земель запаса и перераспределения, выявленных на вновь полученной тематической карте методом управляемой классификации, подтвердило наличие на них молодой древесно-кустарниковой рас-

тельности. Принадлежность исследуемых участков землям фонда запаса и перераспределения подтверждается кадастровыми данными Министерства государственного имущества Республики Марий Эл (рис. 6).

Участки вырубок на снимках дешифрируются достаточно хорошо, в то время как распознавание площадей вырубок с созданными на них лесными культурами было менее точным. На снимках Landsat 2010 г. удалось выделить лесные культуры (рис. 7) возрастом до 10 лет, особенно 5–10-летние насаждения, площадь которых составила 4,7 тыс. га.

На снимках среднего разрешения искусственные насаждения старше 10 лет сливаются с общим фоном соседних насаждений старшего возраста, что приводит к сложности их классификации в качестве категории лесных культур. Подобную закономерность при исследовании лесных культур и молодых насаждений естественного происхождения на снимках Landsat на территории Скандинавии отмечали и другие ученые [11, 12]. Между тем, мониторинг состояния лесных культур с использованием спутниковых снимков имеет большие перспективы для регулирования хозяйственных мероприятий с целью ускоренного роста, выполнения ими защитных функций и накопления фитомассы.

Выводы.

1. Проведенные исследования показали высокую важность спутниковых снимков среднего разрешения Landsat TM и ETM+ и возможность их обработки в современных программных геоинформационных комплексах для проведения дистанционного мониторинга нарушенности земель лесного и сельскохозяйственного назначения. Общая площадь нарушений (сплошные вырубки и пожары) в лесном фонде на территории исследуемого региона (западная часть РМЭ) между 2006-2010 гг. составила 121 тыс. га.

2. На снимках Landsat 2010 г. на исследуемую территорию лесные культуры классифицируются возрастом до 10 лет. Посадки молодых насаждений в возрасте до пяти лет, созданные на вырубках лесного фонда, практически не идентифицируются. Искусственные посадки старше 10 лет начинают сливаться с общим фоном соседних насаждений старшего возраста, что приводит к сложности их выделения в качестве отдельного класса лесных культур. Более детальный мониторинг состояния лесных культур может быть осуществлен с использованием спутниковых снимков высокого разрешения.

3. Предложенная методика исследований мониторинга зарастания древесно-кустарниковой растительностью земель запаса показала высокую точность в процессе валидации полученных тематических карт на местности. По результатам исследований было установлено, что зарастание растительностью наблюдается на площади 45 тыс. га бывших сельскохозяйственных земель Республики Марий Эл, что составляет 46 % от всей территории исследуемых земель запаса и перераспределения (95,8 тыс. га) и свидетельствует о продолжающемся процессе захвата брошенных сельскохозяйственных земель древесной растительностью.

Список литературы

1. Курбанов, Э.А. Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев, Т.А. Александрова // Вестник МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2010. – № 2(9). – С. 14-20.
2. 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.
3. Cohen, W.B. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data / W.B. Cohen, T.K. Maier-sperger, S.T. Gower, D.P. Turner // Remote Sensing of Environment. – 2003. – № 84. – P. 561-571.
4. Kennedy, R.E. Trajectory based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics / R.E. Kennedy, W.B. Cohen, T.A. Schroeder // Remote Sensing of Environment. – 2007. – № 110. – P. 370–386.
5. Schroeder, T.A. Patterns of forest regrowth following clearcutting in western Oregon as determined from a Landsat time-series / T.A. Schroeder, W.B. Cohen, Z. Yang // Forest Ecology and Management. – 2007. – № 243. – P. 259–273.

6. Eriksson, E. Effects of rotation period on biomass production and atmospheric CO₂ emissions from broad-leaved stands growing on abandoned farmland / E. Eriksson, T. Johansson // *Silva Fennica*. – 2006. – № 40(4). – P. 603-613.

7. Уткин, А.И. О наступлении лесной растительности на сельскохозяйственные земли в Верхнем Поволжье / А.И. Уткин, Т.А. Гульбе, Я.И. Гульбе, Л.С. Ермолова // *Лесоведение*. – 2002. – № 5. – С. 44-52.

8. Курбанов, Э.А. Пространственная динамика фитомассы березняков на бывших сельскохозяйственных землях Марийского Заволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, Л.С. Устюгова, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев // *Лесной журнал*. – 2010. – № 3 – С. 8-14.

9. Seto, K.C. Monitoring land-use change in the Pearl River Delta using Landsat TM/ K.C. Seto, C.E. Woodcock, C. Song, X. Huang, J. Lu, R.K. Kaufmann // *International Journal of Remote Sensing*. – 2002. – № 23(10). – P. 1985–2004.

10. Губаев, А.В. Классификация наземного покрова Среднего Поволжья по спутниковым снимкам среднего разрешения / А. В. Губаев, Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, С. А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // *Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международного научно-практического семинара [Электронный ресурс]*. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – С.7-19. URL: <http://csfm.marstu.net/publications.html>

11. Olsson, H. A method for using Landsat time series for monitoring young plantations in boreal forests / H. Olsson // *International Journal of Remote Sensing*. – 2009. – № 30 (19). – P. 5117 – 5131.

12. Nilson, T. Age dependence on forest reflectance: analysis of main driving factors/ T. Nilson, U. Peterson // *Remote Sensing of Environment*. – 1994. – № 48. – P. 319–331.

Статья поступила в редакцию 10.10.11.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, ГК № 02.740.11.5202 Министерства образования и науки Российской Федерации «Региональная оценка методов картирования растительного покрова по спутниковым снимкам», ГК № 02.740.11.0838 «Разработка и реализация алгоритмов передачи, обработки и анализа данных дистанционного зондирования лесных покровов для автоматических расчетов фитомассы растительности и пулов углерода» и тематического плана Министерства науки и образования РФ.

*E. A. Kurbanov, T. V. Nureeva, O. N. Vorobyev, A. V. Gubayev,
S. A. Leznin, T. F. Miftakhov, S. A. Nezamayev, Y. A. Polevshikova*

REMOTE MONITORING OF DISTURBANCES IN FOREST COVER, REFORESTATION AND AFFORESTATION OF MARI ZAVOLZHJE

The questions of the time series Landsat TM and ETM+ images use for the investigation of monitoring of forest disturbances, reforestation on abandoned agricultural lands, and estimation of the areas of forest plantations on the territory of Mari forest Zavolgie have been studied.

Key words: remote sensing, forest disturbances, abandoned agricultural lands, GIS, satellite images.

КУРБАНОВ Эльдар Аликрамович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства МарГТУ, руководитель Центра устойчивого управления лесами. Область научных интересов – устойчивое управление лесами, биологическая продуктивность лесных экосистем, депонирование углерода лесными экосистемами, дистанционное зондирование земли, леса Киото. Автор более 100 публикаций, в том числе учебно-методических работ.

E-mail: kurbanovea@marstu.net

НУРЕЕВА Татьяна Владимировна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесных культур и механизации лесохозяйственных работ МарГТУ. Область научных интересов – искусственное лесовосстановление, плантационное лесовыращивание, производительность лесных культур. Автор более 40 публикаций, в том числе учебно-методических работ.

E-mail: NureevaTV@marstu.net

ВОРОБЬЕВ Олег Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства МарГТУ. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов, депонирование углерода лесными экосистемами, мониторинг лесных экосистем. Автор более 30 публикаций, в том числе учебно-методических работ.

E-mail: vorobievon@marstu.net

ГУБАЕВ Александр Владимирович – соискатель кафедры лесоводства МарГТУ. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор более 20 публикаций.

E-mail: galex@marstu.net

ЛЕЖНИН Сергей Анатольевич – аспирант кафедры лесоводства МарГТУ. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 15 публикаций.

E-mail: lejninsa@marstu.net

МИФТАХОВ Тимур Фаридович – аспирант кафедры лесных культур и механизации лесохозяйственных работ МарГТУ. Область научных интересов – искусственное лесовосстановление, плантационное лесовыращивание, производительность лесных культур сосны обыкновенной. Автор более 10 публикаций.

E-mail: MiftahovTF@marstu.net

НЕЗАМАЕВ Сергей Александрович – аспирант кафедры лесоводства МарГТУ. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор более 10 публикаций.

E-mail: nezamaevsa@marstu.net

ПОЛЕВЩИКОВА Юлия Александровна – программист кафедры лесоводства МарГТУ. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор более 10 публикаций.

E-mail: polevshikovaya@marstu.net