

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ В ЛЕСАХ ЮГА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Э.А. Терехин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Оценка изменений в лесах, обусловленных влиянием негативных факторов, является одной из ключевых задач мониторинга лесных земель. В статье изложен новый подход к автоматизированному геоинформационному картографированию участков лесов с нарушенным древостоем. Метод основан на оценке изменений в высотах лесных насаждений с использованием спектрального отклика. Исследование выполнено на примере лесных массивов юга Среднерусской возвышенности, охватывающего территорию Белгородской области. Для оценки высот предложено использовать логистическую модель, описывающую зависимость коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона от высоты древостоя. Для повышения точности оценки высот предложено использовать виды моделей, использующие спектральные характеристики с конкретных спутниковых сенсоров. Критерием индикации участков нарушенности древостоя является резкое снижение высоты лесных насаждений, обусловленное влиянием негативных факторов. Ограничениями применения метода являются региональные особенности лесных экосистем, наличие участков теней от лесных массивов, расположенных на крутых склонах. С использованием предложенного подхода выполнено геоинформационное картографирование изменений в лесах юга Среднерусской возвышенности в период середины 1980-х – конец 2010-х гг. Подготовлена серия картосхем, пространственно характеризующих произошедшие изменения. С использованием средств геоинформационного анализа выполнена оценка доли нарушенных лесных экосистем в каждом административном районе Белгородской области. В большинстве районов произошло снижение доли нарушенных лесных участков. Установлено, что в исследуемый период доля нарушенных лесных участков на юге Среднерусской возвышенности была сравнительно невелика и составила 1,84 % от общей площади лиственных лесов в середине 1980-х – конце 1990-х гг. и 0,85% в период 2000-2017 гг.

Ключевые слова: лесные экосистемы, лесостепь, нарушенность лесов, геоинформационное картографирование, спутниковые данные, Landsat

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE FOREST OF CENTRAL RUSSIAN UPLAND USING REMOTE SENSING DATA

E.A. Terekhin

Belgorod State National Research University

The assessment of changes in forests caused by the influence of negative factors is one of the key objectives of forest monitoring. The article presents a new approach to automated mapping of forest areas with disturbed stands. The method is based on the estimation of changes in the heights of forest stands using a spectral response. The research was carried out using forest areas in the south of the Central Russian Upland, in the Belgorod Region. In order to assess the heights of the stand, it was proposed to use a logistic model that describes the dependence of the SWIR range spectral response on the height of the forest stand. In order to improve the accuracy of estimating stand heights, it was proposed to use the types of models that use spectral characteristics from specific satellite sensors. The criterion for identifying areas of disturbance in the stand is a significant decrease in the height of forest stands, occurring as a result of negative factors impact. The regional features of forests and shadowed areas on steep slopes can be considered to be the major limitations of the method. The proposed approach enabled the authors to carry out geoinformation mapping of the changes in the forests in the south of the Central Russian Upland over the period from the mid-1980s to the end of 2010s. Schematic maps characterizing the occurring changes have been prepared. Using geoinformation analysis, the share of disturbed forest ecosystems in each administrative district of the Belgorod Region has been estimated. In many districts, the share of disturbed forest ecosystems has decreased. During the reference period the share of disturbed forest areas in the south of the Central Russian Upland was relatively small. It was 1.84% of the total deciduous forest area in the mid-1980s - late 1990s and 0.85% in the period 2000-2017.

Key words: forest ecosystems, forest-steppe, forest disturbance, GIS-mapping, satellite data, Landsat

Введение. Оценка изменений в лесах, обусловленных воздействием негативных факторов, является ключевой задачей мониторинга покрытых лесом земель. В значительной степени она связана с пространственно-временным анализом изменений в лесах, обусловленных влиянием сплошных рубок, пожаров, насекомых-вредителей. В связи с этим актуальность приобретают разработка и совершенствование подходов к выявлению таких изменений, что во многом связано с использованием возможностей данных дистанционного зондирования Земли. Это направление достаточно интенсивно развивается в настоящее время, что во многом обусловлено повышением доступности материалов разновременной спутниковой съёмки и развитием технологий её обработки (Курбанов и др., 2014; Senf et al., 2017; Novo-Fernández, 2018; Ховратович и др., 2019). На текущий момент предложен ряд подходов к автоматизированному картографированию изменений в лесах на разных территориальных уровнях: в первую очередь глобальном и региональном (Healey et al., 2005; Kennedy et al., 2010; Барталев, Лупян, 2013; Курбанов и др., 2015; Potapov et al., 2015). Современные методы выявления изменений используют различные алгоритмы: применение пороговых значений спектральных признаков при выделении исследуемых классов объектов, сегментацию изображений, методы индикации различий на основе сравнения пар разновременных снимков, методы статистического определения границ, включая методы многомерного анализа, использование моделей регрессии.

Тем не менее, данная проблема остаётся во многом открытой в связи с региональными и локальными особенностями лесных экосистем, обусловленными породным составом, фазовыми, а также с появлением новых типов спутниковых данных (Banskota et al., 2014; Zhu, 2017). Эффективное автоматизированное картографирование изменений в лесах на субрегиональном и локальном уровнях обуславливает необходимость разработки регионально адаптированных подходов к автоматизированному определению характеристик лесных массивов и изменений, происходящих в них.

Появление регулярно получаемых многозональных снимков высокого радиометрического разрешения, в первую очередь, Landsat-8, позволило на новом уровне подойти к проблеме количественного анализа биометрических параметров лесных экосистем на основе их спектрально-отражательных признаков. Обусловлено это более высокими информационными возможностями данных Landsat OLI по сравнению с сенсорами предыдущего поколения.

На территории юга Среднерусской возвышенности, охватывающего Белгородскую область и расположенного преимущественно в зоне лесостепи, преобладают лесные насаждения лиственного породного состава. Основная часть лесов отнесена к категории водоохранных и защитных, играющих важное экологическое значение. Большинство лесов относится к нагорным дубравам. Вследствие длительного аграрного освоения в прошедшие столетия площадь земель, покрытых лесом, значительно сократилась и в настоящее время леса представлены преимущественно отдельными сравнительно небольшими лесными массивами. Покрытые лесом земли характеризуются высокой фрагментированностью (Украинский и др., 2017). Вместе с этим в последние десятилетия в регионе наблюдаются тенденции увеличения лесистости (Терехин, Чендев, 2018).

Цель исследования состояла в оценке изменений в лиственных лесах юга Среднерусской возвышенности (территория Белгородской области), обусловленных воздействием нарушающих факторов, разработке новых подходов к автоматизированному картографированию участков нарушенных лесов на основе количественного анализа биометрических параметров лесных массивов и их спектрального отклика. Анализируемый временной интервал включал период с середины 1980-х по конец 2010-х гг.

Задачами исследования являлись:

1. Автоматизированное картографирование изменений в лесах, обусловленных ухудшением состояния древостоя, на юге Среднерусской возвышенности в период середины 1980-х – кон. 2010-х гг.
2. Пространственно-временная оценка участков нарушенных лесных экосистем.
3. Оценка доли нарушенных лесов от общей площади лесных массивов в пределах административных районов Белгородской области.

Материалы, объект и методы исследования. Объектом исследования выступали лиственные леса Белгородской области (рис. 1), суммарной площадью 212651, 1 га при средней площади 73,9 га.



Рис. 1. Местоположение территории исследования

Исследование охватывало 2875 лесных массивов региона, что составляет подавляющую часть лиственных лесов Белгородской области. Для автоматизированного выявления изменений в лесах был предложен новый подход, основанный на количественном анализе биометрических параметров лесных насаждений с использованием их спектрального отклика. Он заключается в выявлении участков лесов с нарушенным древостоем на основе оценки изменений в высотах лесных насаждений, которые в свою очередь измеряются на основе их коэффициентов спектральной яркости. Оценка спектрально-отражательных свойств была осуществлена на основе разновременных космических снимков Landsat TM, ETM+, OLI, полученных с середины 1980-х гг. по конец 2010-х гг.

Снимки серии Landsat являются практически единственным типом спутниковых данных, позволяющих провести данное исследование благодаря длинному периоду спутниковой съёмки и возможности формирования полного покрытия изображений на всю область на конкретные сроки.

В рамках ранее проведённых работ (Терехин, 2012) установлено, что возраст и высота лесных насаждений оказывают статистически значимое влияние на коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) лесных экосистем. Наиболее чувствительными к изменениям в возрасте и высоте лесных насаждений являются коэффициенты отражения инфракрасной зоны спектра (1,55-1,75 мкм) – SWIR-диапазон, соответствующий каналу 5 сенсоров Landsat TM,

ETM+ и каналу 6 сенсора Landsat OLI. Зависимость между исследуемыми показателями может быть использована для количественной оценки высоты лесных насаждений на основе их спектрального отклика. Повышение высот лесных насаждений является следствием нормального развития лесных массивов. Соответственно участки их резкого снижения являются следствием воздействия нарушающих факторов, например, сплошных рубок. Оценка высоты в свою очередь может быть проведена на основе коэффициентов спектральной яркости, достаточно тесно коррелирующих с ней.

Для оценки высоты лесных насаждений использована предложенная зависимость между высотой древостоя и его коэффициентами спектральной яркости SWIR-диапазона. Она имеет вид логистической кривой и получена на основе фактических данных о характеристиках высот лесных насаждений, типичных для региона, и соответствующих им значений КСЯ, измеренных на основе августовских снимков Landsat. Для повышения точности проводимых вычислений использовали два вида зависимости. Первый – полученный на основе данных Landsat TM/ETM+, второй – на основе данных Landsat OLI.

На основе снимков Landsat ETM+ она имеет вид

$$y = 28 - \frac{27,8}{(1 + e^{-90,045x})^{190788,0}}, \quad (1)$$

где y – значения высот, x – значения коэффициентов спектральной яркости SWIR1-диапазона (5-й канал сенсора Landsat TM/ETM+).

На основе данных Landsat OLI она имеет следующие параметры:

$$y = 28 - \frac{27,8}{(1 + e^{-92,3x})^{665276,0}}, \quad (2)$$

где y – значения высот, x – значения коэффициентов спектральной яркости SWIR1-диапазона (6-й канал сенсора Landsat OLI).

Коэффициенты спектральной яркости, используемые в уравнениях 1 и 2, являются безразмерными величинами, принимающими значения в диапазоне от 0 до 1. Они рассчитаны на основе атмосферно и радиометрически скорректированных спутниковых снимков.

Картографирование высоты лесных насаждений было выполнено на три временных среза: середина 1980-х гг., начало 2000-х, конец 2010-х гг. На каждый из них было сформировано полное покрытие территории Белгородской области снимками Landsat, полученными в период августа, являющегося наименее безоблачным месяцем (табл. 1). Растровые модели высот лесных насаждений на периоды середины 1980-х и начала 2000-х гг. вычисляли на основе уравнения (1), растры высот на 2017-2018 гг. – на основе уравнения (2).

Таблица 1

Спутниковые данные Landsat, используемые для оценки высот насаждений и автоматизированного картографирования изменений в лесах на юге Среднерусской возвышенности

Path/Row	Период съёмки и даты получения снимков		
	1980-е гг.	2000-е гг.	2010-е гг.
178/025	07.08.1986	13.08.2000	31.08.2018
177/025	29.08.1985	22.08.2000	24.08.2018
177/024	29.08.1985	22.08.2000	24.08.2018
176/025	28.08.1987	10.08.2001	14.08.2017

Все снимки Landsat прошли этап атмосферной и радиометрической коррекции (Chander et al., 2009; Landsat 8 Data Users Handbook, 2019). Для автоматизированного картографирования высот лесных насаждений и участков нарушенности был использован предварительно подготовленный векторный слой всех лиственных лесов региона, созданный методом ручной оцифровки лесных массивов на основе снимков Landsat. Его использование позво-

лило провести анализ спектрального отклика в пределах контуров лесных участков и оценить особенности динамики отражательных свойств для каждого из них.

Получение экспериментальных результатов было проведено в два этапа. На первом из них осуществили картографирование высот лесных насаждений на каждый временной срез. Для этого в программе ArcGIS был написан алгоритм, использующий на входе спутниковые сцены Landsat каждого временного среза и векторную маску исследуемых лесных массивов. Сущность алгоритма заключается в пересчёте значений КСЯ в значения высот лесных насаждений, растры которых формируются на его выходе. Несмотря на определённые погрешности измерений, обусловленные вариацией спектральных свойств лесных экосистем на космических снимках, данный подход достаточно эффективен при выявлении участков существенных изменений (снижений) высот, обусловленных появлением ареалов нарушенности древостоя. На втором этапе с использованием другого алгоритма, также подготовленного в ArcGIS, были вычислены растры участков нарушенности, идентификация которых производилась методом оценки изменения высот насаждений в каждый исследуемый временной интервал: 1985-2000 гг. и 2000-2017 гг. К участкам изменений в древостое в автоматическом режиме относили фрагменты растров, на которых снижение высот составляло 12 м и более между начальной и конечной анализируемой датой, например, 1985 г. и 2000 г.

Ошибки, связанные с использованием предложенного подхода, обусловлены следующими причинами: тенями от лесных массивов, расположенных на относительно крутых склонах, и наличие небольшой облачности на некоторых фрагментах спутниковых изображений. Они были отредактированы вручную в процессе проверки полученных результатов и их сопоставления с разновременными спутниковыми данными Landsat, на которых участки изменений в лесах достаточно выявляются при визуальном просмотре. Полученные материалы позволили создать картосхемы лесов с нарушениями древостоя, провести пространственный анализ изменений в лесах.

Результаты. Применение предложенного метода позволило в автоматизированном режиме провести картографирование участков негативных изменений в лесах, появившихся в период с середины 1980-х по конец 2010-х гг., для подавляющей части лиственных лесных насаждений Белгородской области (2785 лесных массивов). Сравнение результатов автоматизированного картографирования с фактическими изменениями (рис. 2, 3) показало, что предложенный подход может быть достаточно эффективно применён для выявления участков лесов с нарушениями древостоя.



Рис. 2. Пример изменений в древостое лиственных лесов юга Среднерусской возвышенности на снимках Landsat в начале 2000-х гг. и в конце 2010-х гг.

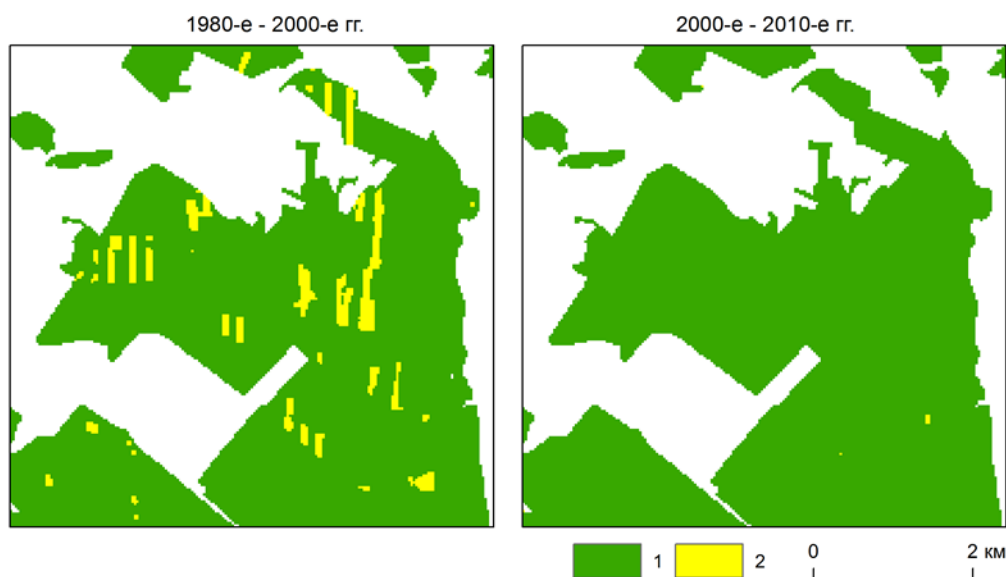


Рис. 3. Пример автоматизированного дешифрирования участков лесных массивов с нарушенным древостоем на юге Среднерусской возвышенности в период с середины 1980-х г. по конец 2010-х гг.
1 – леса без нарушений древостоя, 2 – нарушенные леса

Наиболее эффективно его использование при дешифрировании участков негативных изменений сложной формы, когда размер участков сопоставим с размером пикселей снимка. Преимуществом подхода является также то, что он учитывает различия в спектральных характеристиках сенсоров Landsat TM и OLI, т.к. использует раздельную оценку высот насаждений на основе уравнений, вычисленных с учётом спектрально-отражательных свойств снимков с каждого сенсора.

Главным ограничением используемого подхода является его изначальная адаптация к лесам Среднерусской возвышенности, в которых преобладают лиственные породы: дуб и ясень. Но одновременно в этом заключается и его преимущество при картографировании изменений в лесах региона. Кроме того, обязательным условием предложенного метода является точная взаимная привязка разновременных космических снимков

Анализ полученных результатов позволил установить ряд тенденций в изменении состояния лесных массивов юга Среднерусской возвышенности. Основной особенностью изменения состояния лесов лиственного породного состава в период с середины 1980-х по конец 2010-х гг. является снижение площади участков с нарушениями древостоя. Необходимо отметить, что выявленная особенность характерна для лиственных лесов и не учитывает хвойные (сосновые) леса региона, которые не являлись объектом исследования. В целом на основе полученных данных, по региону в период с середины 1980-х по конец 1990-х гг. доля участков с нарушенным древостоем в лиственных лесах составила 1,83 %. В период 2000-2017 гг. этот показатель был равен 0,85 %. В большинстве административных районов Белгородской области в исследуемый период произошло снижение доли нарушенных лесных участков (рис. 4).

Таким образом, основная часть лиственных лесов региона в последние десятилетия характеризовалась относительно невысокой долей нарушенности древостоя, обусловленной воздействием негативных факторов.

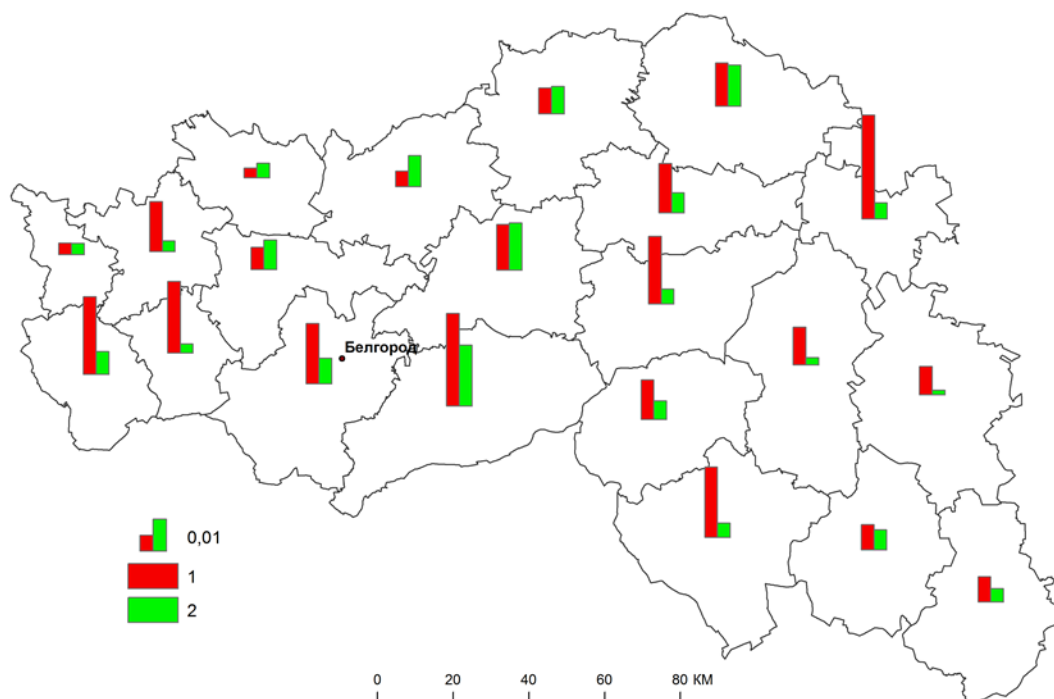


Рис. 4. Изменение доли нарушенных лесных участков от общей площади лесных массивов в районах Белгородской области в период с середины 1980-х гг. по конец 2010-х гг.: 1 – доля нарушенных лесных участков в период 1985-2000 гг., 2 – доля нарушенных лесных участков в период 2000-2017 гг.

Выводы. Предложен способ автоматизированного выявления негативных изменений в лесах, основанный на количественной оценке высот лесных насаждений с использованием их спектрального отклика. Метод использует количественную зависимость, описывающую влияние высот лесных насаждений на их коэффициенты спектральной яркости SWIR-диапазона. С использованием предложенного метода выполнено автоматизированное картографирование изменений в лесных массивах юга Среднерусской возвышенности, обусловленных нарушениями древостоя, в период середина 1980-х – конец 2010-х гг. Изучены пространственно-временные особенности произошедших изменений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-20018

Библиографический список

1. Барталев С.А., Лупян Е. А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса . 2013. Т. 10. № 1. С. 197-214.
2. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Полевщикова Ю. А., С. А. Лежнин С.А. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13 № 4 С. 124-134.
3. 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.
4. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Лежнин С.А., Губаев А.В., Полевщикова Ю.А. Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности : монография. Йошкар-Ола: ПГТУ. 2015. 131 с.
5. Терехин Э.А. Анализ каналов спутниковых данных Landsat ТМ для оценки характеристик лесных насаждений Лесостепной провинции Среднерусской возвышенности // Исследование Земли из космоса . 2012. № 2 . С. 53-61.
6. Терехин Э.А., Чендев Ю. Г. Оценка изменения лесистости в современный период на юге Среднерусской возвышенности с использованием материалов разновременных космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – 2018. – Т. 15. – № 3. – С.114-126.

7. Украинский П.А., Терехин Э. А., Павлюк Я.В., Фрагментация лесов верхней части бассейна реки Ворскла с конца XVIII века // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. № 1. С. 82-91.
8. Ховратович Т.С., Барталев С.В., Кашницкий А. В. Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16 № 4. С. 102-110.
9. Banskota A., Kayastha N., Falkowski M. J., Wulder M. A., Froese R. E., White J. C. Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review // Canadian Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 40, No. 5. P. 362-384.
10. Chander G., Markham B. L., Helder D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113, No. 5. P. 893-903.
11. Healey S., Cohen W., Zhiqiang Y., Krankina O. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 97, № 3. P. 301-310.
12. Kennedy R.E., Yang Z., Cohen W. B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114, No. 12. P. 2897-2910.
13. Landsat 8 Data Users Handbook. Department of the Interior U.S. Geological Survey. Sioux Falls, South Dakota. 2019. 106 p.
14. Novo-Fernández A., Franks S., Wehenkel C., López-Serrano P. M., Molinier M., López-Sánchez C. A. Landsat time series analysis for temperate forest cover change detection in the Sierra Madre Occidental, Durango, Mexico // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. Vol. 73. P. 230-244.
15. Potapov P.V., Turubanova S. A., Tyukavina A., Krylov A. M., J. L. McCarty, V. C. Radeloff, M. C. Hansen Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive / P. V. Potapov, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, A. M. Krylov, J. L. McCarty, V. C. Radeloff, M. C. Hansen // Remote Sensing of Environment – 2015. – Vol. 159. – P. 28-43.
16. Senf C., Pflugmacher D., Hostert P., Seidl R. Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. Vol. 130. P. 453-463.
17. Zhu Z. Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. Vol. 130. P. 370-384.

References

1. Bartalev S.A., Loupian E.A. Issledovaniya i razrabotki IKI RAN po razvitiyu metodov sputnikovogo monitoringa rastitel'nogo pokrova [R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **2013**, Vol. 10, No. 1, pp. 197-214.
2. Vorob'ev O.N., Kurbanov E. A., Polevshchikova Yu. A., Lezhnin S. A. Otsenka dinamiki i narushennosti lesnogo pokrova v srednem povolzh'e po snimkam landsat [Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **2016**, Vol. 13, No. 4, pp. 124-134.
3. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Lezhnin S.A., Gubaev A.V., Polevshchikova Yu.A. Tematicheskoe kartirovanie rastitel'nogo pokrova po sputnikovym snimkam: validatsiya i otsenka tochnosti [Thematic mapping of vegetation by satellite imagery: validation and accuracy assessment]: monografiya, Yoshkar-Ola, **2015**, 131 p.
4. Terekhin E.A. Analiz kanalov sputnikovyykh dannykh landsat TM dlya otsenki kharakteristik lesnykh nasazhdeniy Lesostepnoy provintsii Srednerusskoy vozvysheynosti [The Analysis of Landsat TM Data for the Forest Parameters Estimation in the Forest Steppe Province of Central Russian Upland], *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, **2012**, No. 2, pp. 53-61.
5. Terekhin E.A., Chendev Y. G. Otsenka izmeneniya lesistosti v sovremennyy period na yuge Srednerusskoy vozvysheynosti s ispol'zovaniyem materialov raznovremennykh kosmicheskikh s"yomok [Estimation of forest cover changes during modern period in the south of the Central Russian Upland using multiyear remote sensing data], *Sovremennyye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, **2018**, Vol. 15, No. 3, pp. 114-126.
6. Ukrainskiy P.A., Terekhin E.A., Pavlyuk Y.V. Fragmentatsiya lesov verkhney chasti basseyna reki Vorskla s kontsa XVIII veka [Fragmentation of forests in the upper part of the Vorskla river basin since the end of the 18th century], *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*, **2017**, No. 1, pp. 82-91.
7. Khovratovich T.S., Bartalev S.A., Kashnitskiy A. V. Metod detektirovaniya izmeneniy lesov na osnove podpiksel'noy otsenki proyektivnogo pokrytiya drevesnogo pologa po raznovremennym sputnikovym izobrazheniyam [Forest change detection based on sub-pixel estimation of crown cover density using bitemporal satellite data], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **2019**, Vol. 16, No. 4, pp. 102-110.
8. Banskota A., Kayastha N., Falkowski M., Wulder M.A., Froese R.E., White J.C. Forest monitoring using Landsat time-series data—A review, *Canadian Journal of Remote Sensing*, **2014**, Vol. 40, pp. 362–384.
9. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment*, **2009**, Vol. 113, No. 5, pp. 893–903.
10. Healey S., Cohen W., Zhiqiang Y., Krankina O. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for

- use in forest disturbance detection, *Remote Sensing of Environment*, **2005**, Vol. 97, No. 3, pp. 301-310.
11. Kennedy R.E., Yang Z., Cohen W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms, *Remote Sensing of Environment*, **2010**, Vol. 114, No. 12, pp. 2897-2910.
 12. Landsat 8 Data Users Handbook. Department of the Interior U.S. Geological Survey. Sioux Falls, South Dakota. **2019**. 106 p.
 13. Novo-Fernández A., Franks S., Wehenkel C., López-Serrano P.M., Molinier M., López-Sánchez C.A., Landsat time series analysis for temperate forest cover change detection in the Sierra Madre Occidental, Durango, Mexico, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **2018**, Vol. 73, pp. 230-244.
 14. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Remote Sensing of Environment*, **2015**, Vol. 159, pp. 28-43.
 15. Senf C., Pflugmacher D., Hostert P., Seidl R. Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **2017**, Vol. 130, pp. 453-463.
 16. Zhu Z. Change detection using Landsat time series: a review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **2017**, Vol. 130, pp. 370-384.