

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ НАРУШЕННОСТИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗНОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ



Введение

Использование геоинформационного моделирования и методов пространственной статистики является одним из актуальных направлений мониторинга лесных экосистем, включая оценку нарушения насаждений. На территории юго-запада Среднерусской возвышенности, располагающейся преимущественно в зоне лесостепи и охватывающей Белгородскую область, сплошные лесосечные рубки длительное время были одним из основных факторов, нарушающих структуру лесного полога. Нарушенность древостоя может быть оценена в процессе сплошных лесоустроительных работ путем оценки таксационных параметров, в первую очередь возраста лесных массивов. Проведение лесоустройства классическими методами позволяет получить обширную и достоверную информацию о состоянии лесных насаждений. В то же время оно трудоемко и проводится один раз в 10 или 20 лет. Для эффективного лесного хозяйства и эксплуатации лесных массивов сведения об их состоянии во многих случаях требуются значительно чаще.

Вследствие охвата значительных территорий и наличия многозонального режима разновременные спутниковые снимки могут выступать источником информации о нарушении лесов [1-3], в том числе вследствие сплошнолесосечных рубок. К настоящему времени для их мониторинга уже разработан ряд подходов [4-6]. Для территории России, характеризующейся значительной площадью лесопокрываемых земель, решение задач их мониторинга является крайне актуальной задачей, включая разработку технологий автоматизированного анализа изменений [7]. В то же время эффективное лесное хозяйство требует получения информации не только на уровне региона, но и на уровне конкретных лесных массивов или их лесотаксационных выделов. Повышение точности проводимых на основе спутниковых данных оценок может быть осуществлено путем использования методов пространственной статистики, которые позволяют выполнять географические исследования на новом уровне [8]. Ее возможности для анализа лесопокрываемых земель

достаточно перспективны [9]. В отличие от традиционных статистических методов, пространственная статистика использует данные о пространстве, что очень важно для исследований, имеющих территориальный компонент [10, 11].

Цель работы заключалась в выполнении пространственно-временного моделирования нарушения лесных экосистем, типичных для юга Среднерусской Лесостепи, на основе разновременных спутниковых данных и с использованием возможностей геоинформационных систем. В работе была поставлена задача оценки нарушения лесов на территориальном уровне, сопоставимом с размером лесотаксационных выделов.

Материалы и методика исследования

Нарушенность лесных экосистем вследствие влияния сплошных лесосечных рубок может быть оценена путем анализа насаждений, сформировавшихся или формирующихся на их участках. Для задач лесоведения и лесного хозяйства актуален мониторинг сильнонарушенных лесных экосистем. Участки лесопокрываемых земель, на которых еще не сформировалось сомкнутое лесное сообщество после влияния нарушающего фактора, могут рассматриваться как сильнонарушенные экосистемы [12]. В первую очередь к таким территориям относятся участки сплошных лесосечных рубок возрастом до 25-30 лет. Для проведения исследований было выбрано урочище «Мелкий Лес» площадью 1471 га, располагающееся в Борисовском районе Белгородской области (рис. 1). Оно представляет собой типичный для условий лесостепи лесной массив, основу породного состава которого составляют разновозрастные насаждения лиственного породного состава. В древостое доминируют дуб и ясень.

Исследование включало несколько этапов. На первом из них на объект исследования было получены и проанализированы данные лесоустройства 1995 года, включающие лесотаксационное описание выделов. На его основе в программе ArcGIS была подготовлена векторная основа, содержащая местоположение каждого выдела с прикрепленной

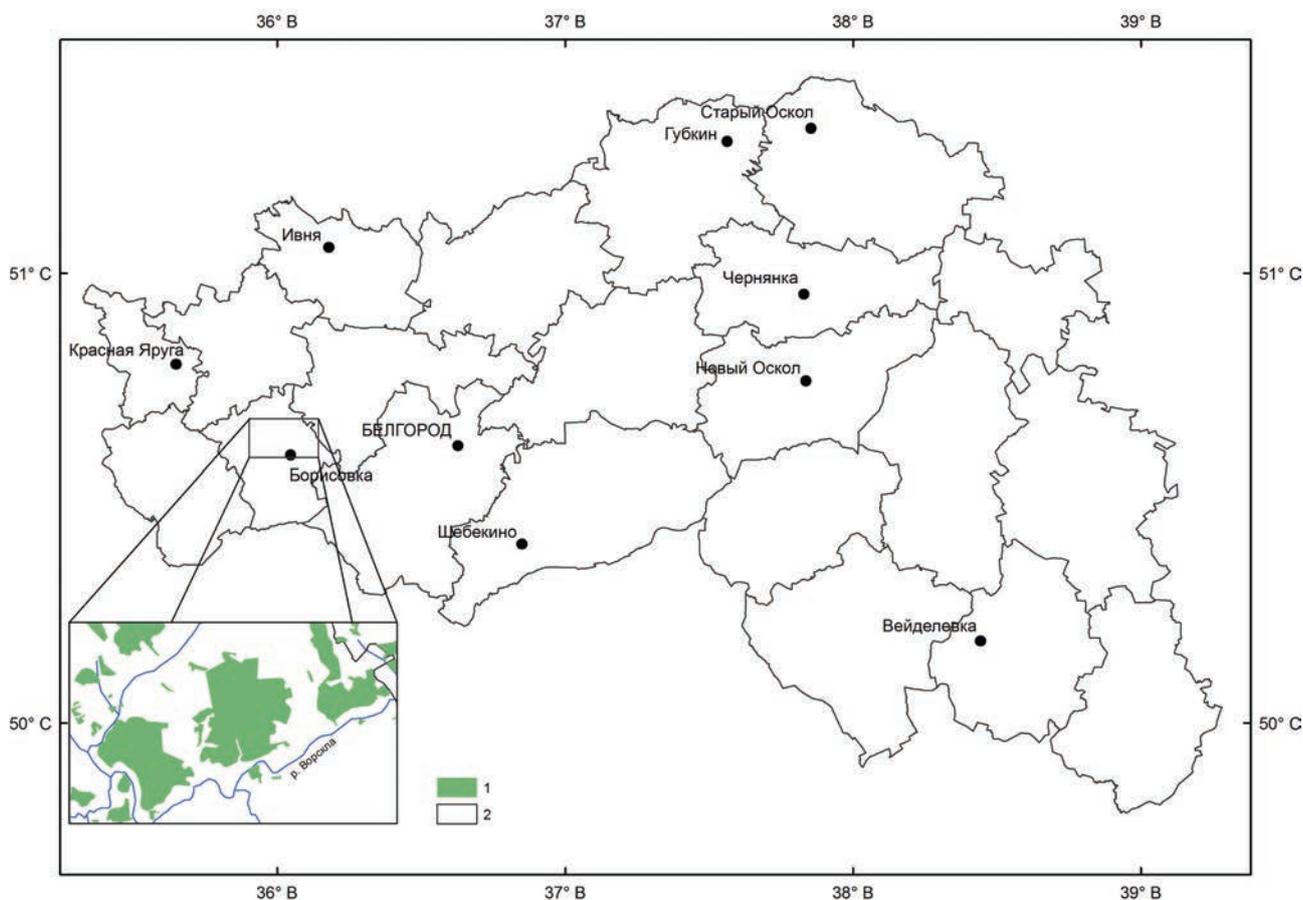


Рис. 1. Местоположение объекта исследования на территории Белгородской области.
1 – лесопокрытые земли, 2 – административные границы

к нему лесоустроительной информацией о возрасте и других таксационных параметрах.

На следующем этапе была выполнена подборка разновременных снимков с сенсора Landsat TM с пространственным разрешением 30 м. Используемые изображения были получены 13.06.1986 г., 21.06.1992 г., 24.06.1996 г., 06.07.2006 г., 28.06.2009 г., 02.06.2011 года и были подобраны на один и тот же месяц, чтобы фенологические различия в сопоставляемых датах были минимальными. Для объективного анализа динамики спектрально-отражательных свойств для всех снимков была выполнена атмосферная и радиометрическая коррекция в соответствии с методикой корректировки данных Landsat [13], в результате которой они были переведены в безразмерные коэффициенты отражения (коэффициенты спектральной яркости, КСЯ).

Третий этап включал исследование связи коэффициентов отражения с возрастом и состоянием лесных насаждений с использованием методов пространственной статистики. На основе обработанных данных лесоустройства в программе STATISTICA нами было оценено влияние возраста лесного насаждения на значения его коэффициентов отражения

инфракрасного, NIR-диапазона (1,55-1,75 мкм). После этого с применением космического снимка 24.06.1996 (по дате получения наиболее близкого к срокам проведения лесоустроительных работ) с использованием инструмента «Метод наименьших квадратов» в программе ArcGIS была изучена связь между возрастом лесного насаждения и коэффициентами отражения в инфракрасной зоне спектра. Из всех диапазонов Landsat TM этот участок спектра (5-й канал) является наиболее информативным для изучения биофизических параметров лесных насаждений [14]. Исходную аналитическую выборку для количественного анализа связи между оцениваемыми параметрами составила совокупность лесотаксационных выделов с известными данными о возрасте и коэффициентах отражения. Исходя из того, что пространственное разрешение снимков Landsat TM составляет 30 м, из анализа были исключены таксационные выделы площадью менее 1 га, т.к. для них был проблематичен достоверный расчет спектрально-отражательных характеристик по снимку. Также из анализа были исключены выделы возрастом более 100 лет. По состоянию на середину 1990-х гг. таких выделов было крайне мало, что не

дало возможности объективно оценить их спектральный отклик. После расчета уравнения связи была оценена случайность расположения анализируемых объектов, т.е. выделов в пространстве, или, иными словами, отсутствие их кластеризации (необходимое условие объективности рассчитанной модели) путем оценки пространственной автокорреляции остатков невязок (остатков) – инструмент «Пространственная автокорреляция (Morans I)». В отличие от методов классической статистики инструмент ArcGIS позволяет не только рассчитывать уравнения связи между изучаемыми факторами, но и исследовать особенности их взаимодействия в географическом пространстве, что позволяет более объективно оценить зависимость и использовать ее в дальнейшем для картографирования анализируемых параметров.

На последнем этапе после изучения связи возраста лесных насаждений и инфракрасных коэффициентов отражения было выполнено пространственно-временное картографирование сильно нарушенных участков лесного массива. Оно было осуществлено путем оценки площади сплошных лесосечных рубок возрастом до 25 лет за период 1986-2011 годы. Для выявления сильно нарушенных участков была использована следующая последовательность действий:

– вся территория лесного массива была разбита на ячейки квадратной формой со стороной 100 метров, за исключением краевых частей. Обозначенный размер ячейки был выбран с учетом пространственного разрешения исходных снимков, но одновременно таким образом, чтобы максимально учесть произошедшие изменения в структуре насаждений. Кроме того, такой прием позволил более точно оценить пространственное распределение значений коэффициентов отражения, по сравнению с их расчетом в пределах лесотаксационных выделов, имеющих более крупную форму.

– на основе снимков Landsat для каждой ячейки были рассчитаны значения коэффициентов отражения в инфракрасном диапазоне (5-й канал сенсора TM).

– значения NIR-диапазона пересчитали в значения возраста на основе рассчитанного на предыдущем этапе уравнения.

– на каждый анализируемый срез оценили площадь ячеек, характеризующихся возрастом до 25 лет, и сформулировали выводы о пространственно-временной динамике степени нарушенности лесных экосистем вследствие сплошных лесосечных рубок.

Результаты и их обсуждение

На основе выборки из 318 лесотаксационных выделов были рассчитаны параметры модели, характеризующей связь между возрастом насаждения и его коэффициентами в NIR-диапазоне, 1,55-1,75 мкм (табл. 1).

Таким образом, получено следующее уравнение, описывающее связь между возрастом леса и его коэффициентами спектральной яркости в ближнем инфракрасном диапазоне:

$$\text{Возраст} = 216,7 - 1189,49 \text{ NIR},$$

где NIR – коэффициенты отражения в инфракрасной области спектра.

Из табл. 1 видно, что коэффициенты уравнения статистически значимы. В табл. 2 приведены показатели качества рассчитанной модели.

F-статистика и статистика Вальда характеризуют общую значимость рассчитанного уравнения. Общая значимость модели является необходимым условием ее дальнейшего использования. Из таблицы 2 видно, что оба параметра являются значимыми (уровни значимости меньше 0,05, поэтому нулевая гипотеза об отсутствии значимости отвергается). Статистика Кенкера и Жака-Бера являются тестами, описывающими связь между переменными в пространстве. Статистика Кенкера характеризует стационарность и скедастичность модели, т.е. насколько связь между переменными (возрастом и коэффициентами отражения в NIR-диапазоне) постоянна, иными словами, стационарна в географическом пространстве. Статистическая значимость этого критерия указывает на отсутствие стационарности и необходимость использования других методов оценки связи между переменными, например географически взвешенной регрессии (ГВР). В нашем случае статистика Кенкера незначима (уровень значимости больше 0,05, нулевая гипотеза о наличии стационарности принимается).

Таблица 1

Характеристика переменных модели связи возраста лесного насаждения и коэффициентов отражения в NIR-диапазоне

Переменная	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	Значимость
NIR	-1189,49	43,01	-27,66	0,00
Свободный член	216,7	6,34	34,16	0,00

Таблица 2

Параметры, характеризующие качество рассчитанной модели

Геоэкология

Параметр	Значение параметра	Уровень значимости
Коэффициент детерминации R ²	0,71	0,00
F-статистика	764,90	0,00
Статистика Вальда	1051,70	0,00
Статистика Кенкера (BP)	2,62	0,10
Статистика Жака-Бера (JB)	2,77	0,25
Пространственная автокорреляция (Морана I)	0,015	0,62

Статистика Жака-Бера оценивает нормальность распределения остатков (в терминологии ArcGIS-невязок). Если этот показатель является статистически значимым, то прогнозирование на основе модели оказывается смещенным. В нашем случае этот критерий оказался статистически незначимым. Таким образом, подтверждена тесная и стационарная связь между возрастом лесного насаждения и коэффициентами отражения NIR-диапазона, характеризующаяся отсутствием асимметрии (смещения) в распределении остатков. Индекс Морана I характеризует наличие кластеризации остатков, на что указывает статистическая значимость этого показателя. При наличии их кластеризации дальнейшее использование уравнения будет некорректным. В нашем случае этот параметр статистически незначим. Таким образом, можно сделать вывод, что рассчитанное уравнение статистически значимо, характеризуется стационарностью и несмещенностью оценок.

Необходимо отметить, что рассчитанное уравнение не является строгой зависимостью, позволяющей на основе спектральных характеристик с точностью до одного года оценивать возраст лесных насаждений, но для оценки класса возраста конкретных участков или таксационных выделов (что необходимо для задач исследования) это уравнение вполне может быть использовано. Оценка результатов его применения показала, что из 81 таксационного выдела возрастом до 25 лет было правильно выявлено 70 единиц, т.е. точность распознавания молодых насаждений составила 86%. При этом выявленное количество выделов с молодыми насаждениями оказалось несколько меньше их реального числа.

Анализ средних значений NIR-диапазона, соответствующих разным классам возраста (за величину класса использован интервал в 20 лет), показал, что по мере его увеличения наблюдается последовательное снижение величины коэффициентов отражения (табл. 3, рис. 2). Исходя из таблицы 3, можно предположить, что наиболее полно

связь между возрастом насаждения и КСЯ, по всей видимости, будет описываться уравнением, имеющим вид, близкий к экспоненциальному. Обусловлено это тем, что средние значения NIR-диапазона для молодых насаждений возрастом до 20 лет наиболее сильно отличаются от значений остальных классов возраста.

В то же время анализ полученного линейного уравнения показал, что оно также может быть использовано для выявления молодых насаждений, соответствующих сплошным рубкам, возрастом до 25 лет, на основе значений NIR-диапазона.

Дополнительная оценка используемой модели была проведена путем сопоставления снимков за конкретные даты с распределением значения КСЯ в инфракрасном диапазоне, рассчитанных в пределах регулярной сети ячеек. Оно также продемонстрировало высокую чувствительность КСЯ NIR-диапазона к изменению возраста сплошных лесосечных рубок (рис. 3).

Из рис. 3 наглядно видно, что с увеличением возраста лесных насаждений происходит снижение доли ячеек, имеющих высокие значения в КСЯ NIR-диапазоне. Одновременно видно, коэффициенты отражения в этой спектральной области чувствительны к появлению новых сплошных рубок, т.к. к нарушению древостоя (юго-восточная часть лесного массива). Из снимков на рис. 3 видно, что в период 1986-2011 гг. наблюдалось снижение нарушенности древостоя и повышение возраста лесного массива. Это нашло выраженное отражение в пространственном распределении ячеек, имеющих разные значения коэффициентов отражения в инфракрасной области спектра. Стоит добавить, что в отличие от анализа просто растровых изображений каждая ячейка имеет вычисленную площадь и иную атрибутивную информацию, которую можно добавлять и уточнять. В этом заключается преимущество использования геоинформационного подхода по сравнению обычным тематическим анализом снимков.

Полученные на предыдущем этапе результаты позволили выполнить оценку нарушенности

Таблица 3

**Значения коэффициентов отражения NIR-диапазона (1,55-1,75 мкм)
для классов возраста лесных насаждений**

Класс возраста	Среднее	Число измерений	Ст. откл.	Коэф. вар.	Стд. ош.
1	0,167	76	0,008	4,8	0,0009
2	0,146	56	0,010	6,5	0,0013
3	0,140	119	0,007	5,0	0,0006
4	0,135	67	0,006	4,3	0,0007

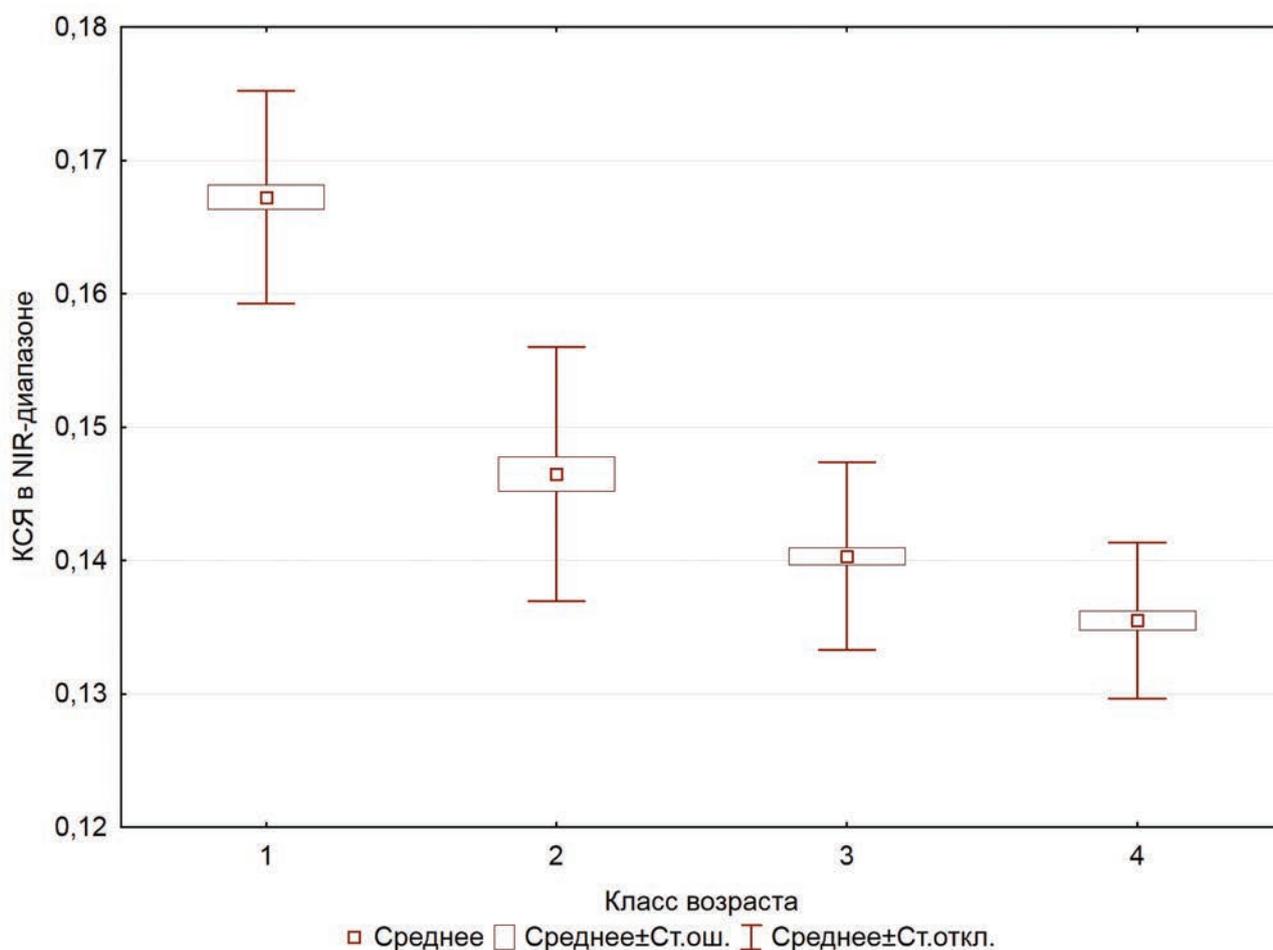


Рис. 2. Коэффициенты отражения (КСЯ) в NIR-диапазоне для классов возраста лесных насаждений (класс возраста – 20 лет)

лесных экосистем урочища «Мелкий Лес» вследствие влияния сплошных лесосечных рубок. Из табл. 4 видно, что площадь лесных массивов возрастом до 25 лет выросла с 1986 по 1992 год, но во все последующие промежутки времени она снижалась. С 1992 г. по 2009 г. она снизилась почти в 2,5 раза.

Таким образом, доля сильнонарушенных лесных экосистем, соответствующих сплошным рубкам возрастом до 25 лет, сократилась в 2,5 раза. Эти данные подтверждены визуальным анализом

разновременных космических снимков и отражают тенденцию снижения площадей сплошных лесосечных рубок, наблюдающуюся в области с начала 1990-х годов.

Выводы

С использованием серий разновременных спутниковых данных Landsat TM и методов пространственной статистики изучена возможность оценки нарушенности лесных экосистем, типичных



Рис. 3. Сравнение исходных разновременных снимков с результатами оценки пространственно-временного изменения коэффициентов отражения NIR-диапазона (1,55-1,75 мкм)

Таблица 4

Динамика площади лесных массивов с возрастом моложе 25 лет, вычисленная на основе значений NIR-диапазона

Диапазон	13.06.1986	21.06.1992	24.06.1996	06.07.2006	28.06.2009
Число ячеек с возрастом до 25 лет	402	495	325	292	220
Площадь ячеек с возрастом до 25 лет, га	332,1	427,8	280,3	256,9	178,2
Доля от общей площади лесного массива, %	22,7	29,2	19,2	17,6	12,2

для юго-запада Среднерусской возвышенности на основе коэффициентов отражения в инфракрасном диапазоне спектра (1,55-1,75 мкм). Рассчитано и проанализировано уравнение зависимости коэффициентов отражения в инфракрасном спектральном диапазоне от возраста насаждений, позволившее достаточно эффективно выявлять насаждения с возрастом до 25 лет. С его использованием на примере листового лесного массива «Мелкий Лес» (основной породный состав верхнего яруса – дуб и ясень) выполнена оценка изменения площади сильнонарушенных участков. Установлено, что с 1992 по 2009 годы доля таких насаждений уменьшилась почти на 30% с 29,2% до 12,2%, что можно интерпретировать как аналогичное снижение участков с сильной нарушенностью верхних ярусов лесного массива.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-4611.2016.5.

Ключевые слова: геоинформационные системы, дистанционное зондирование, Landsat, пространственная статистика, нарушенность лесных экосистем, юго-запад Среднерусской возвышенности.

ЛИТЕРАТУРА

- Hansen M.C., Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G., Moore B., Hancher M., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Komareddy A., Egorov A. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // *Sci-ence*. – 2013. – V. 342, Is. 6160. – P. 850-853.
- Lambert J., Denux J.-P., Cheret V., Verbesselt J., Balent G. Detecting clear-cuts and decreases in forest vitality using MODIS NDVI time series // *Remote Sensing*. – 2015. – V. 7, Is 4. P. 3588-3612.
- DeVries B., Verbesselt J., Kooistra L., Herold M. Robust monitoring of small-scale forest disturbances in a tropical montane forest using Landsat time series // *Remote Sensing of Environment*. – 2015. – V. 161. – P. 107-121.
- Wilson E.H., Sader S.A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery // *Remote Sensing of Environment*. – 2002. – V. 80. – P. 385-396.
- Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю. Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2005. – Т. 2, № 2. – С. 217-227.
- Борзов С.М., Потатуркин О.И. Обнаружение выборочных рубок леса по данным дистанционных измерений высокого пространственного разрешения // *Исследование Земли из космоса*. – 2014. – № 4. – С. 87.
- Кобец Д.А., Матвеев А.М., Мазуров А.А., Прошин А.А. Организация автоматизированной многопоточной обработки спутниковой информации в системах дистанционного мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2015. – Т. 12, № 1. – С.145-155.
- Webster R., Oliver M.A. *Geostatistics for environmental scientists*, second edition. –Chichester : Wiley, 2007. – 330 p.
- Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Губаев А.В., Полевщикова Ю.А., Демишева Е.Н., Ко-птелов В.О. Дистанционный мониторинг городских лесов // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 1 (25). – С. 5-21.
- Dorman C. Effects of incorporating spatial autocorrelation into the analysis of species distribution data // *Global Ecology and Biogeography*. – 2007. – № 16. – P. 129-138.
- Буряк Ж.А., Лисецкий Ф.Н., Маринина О.А. Использование ГИС-технологий и гео-статистики для дифференциации агрохозяйственных зон древнеземледельческих районов // *Геоинформатика*. – 2016. – № 4. – С. 28-35.
- Бабинцева Р.М., Горбачев В.Н., Лебедева А.А. Применение методов картографии при планировании и ведении лесопаркового хозяйства // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. – 2008. – Т. 3, № 19-1. С. 45-48.
- Chander G., Markham B., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // *Remote Sensing of Environment*. 2009. – V. 113, Is. 5 – P. 893-903.
- Терехин Э.А. Анализ каналов спутниковых данных Landsat TM для оценки характеристик лесных насаждений лесостепной провинции Среднерусской возвышенности // *Ис-следование Земли из космоса*. – 2012. – № 2. – С. 53-61.