

Закономерности влияния типов нарушенности широколиственных лесов лесостепи на их спектрально-отражательные характеристики

Э. А. Терехин

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Белгород, 308015, Россия
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

Нарушенность выступает одним из ключевых показателей, характеризующих состояние лесных сообществ. Статья посвящена оценке влияния наиболее распространённых типов нарушений в широколиственных лесах Среднерусской лесостепи на их спектрально-отражательные свойства, измеряемые по данным дистанционного зондирования Земли: болезней деревьев, насекомых-вредителей, сплошных рубок. Для спектрально-отражательных характеристик ближнего и коротковолнового инфракрасного (ИК) диапазонов в ряду «сплошные рубки – влияние энтомовредителей – влияние болезней – ненарушенные леса» наблюдается последовательное снижение, связанное с уменьшением величины воздействия негативных факторов. Аналогичных закономерностей для коэффициентов спектральной яркости видимого диапазона не выявлено. В диапазонах ближнего и коротковолнового ИК-спектра установлены статистически значимые различия между всеми типами нарушенности. При этом значимых отличий участков нарушений вследствие болезней деревьев от ненарушенных лесов не установлено ни в одном диапазоне. Влияние насекомых-вредителей и болезней деревьев обуславливает формирование положительного плавного тренда в спектрально-отражательных характеристиках коротковолнового ИК-диапазона. Его наличие выступает признаком соответствующих типов нарушений. Появление сплошных рубок обуславливает резкое 50–60%-е увеличение отражательной способности в коротковолновом ИК-диапазоне. Отсутствие нарушений в лесах обуславливает отрицательную тенденцию коэффициентов спектральной яркости или отсутствие выраженного тренда в зависимости от возраста леса.

Ключевые слова: нарушенность лесов, широколиственные леса, Landsat, данные дистанционного зондирования, многолетние ряды

Одобрена к печати: 01.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-161-172

Введение

Оценка нарушенности наряду с восстановительной динамикой выступает ключевой задачей в системе количественного анализа и моделирования развития лесных экосистем. Нарушения в лесах, вызванные воздействием негативных факторов, обуславливают изменения в комплексе их параметров, степень трансформации которых зависит от типа и величины воздействия нарушающего фактора. Возникновение участков нарушений в лесах приводит к изменениям их биомассы (Frolking et al., 2009), углерододепонирующей способности (Замолотчиков и др., 2013; Zhao et al., 2018), оказывает влияние на биоразнообразие (Шорохова и др., 2022).

Проблема исследования нарушенности лесов на основе спутниковых данных относится к одной из наиболее актуальных задач применения данных дистанционного зондирования Земли. К настоящему времени достигнуты значительные успехи в области автоматизированного распознавания лесов с нарушениями верхних ярусов, предложены различные подходы к их идентификации. Среди них необходимо выделить методы декомпозиции спектральных смесей (Барталев и др., 2005; Bullock et al., 2020), алгоритмы временной сегментации рядов изображений (Kennedy et al., 2010), методы оценки отклонений спектрально-отражательных признаков от многолетних значений (Huang et al., 2010), способы анализа индексов нарушенности (Воробьев и др., 2016; Frantz et al., 2016), методы дискриминантного анализа (Терехин, 2019, 2020). В последнее десятилетие для выявления нарушенных лесов также

всё шире применяются способы, использующие искусственные нейросети (Yuan et al., 2020; Slagter et al., 2023). Основное ограничение при анализе нарушенности лесов для большинства типов данных дистанционного зондирования Земли, за исключением лидарных, связано с тем, что на отражательные свойства насаждений оказывают влияние нарушения, затрагивающие верхние ярусы. Оценка нарушенности лесов во многих случаях требует анализа многолетних рядов изображений, для исследования которых наибольшие возможности предоставляют данные со спутников серии Landsat. Они считаются наиболее эффективной информацией для решения подобных задач (DeVries et al., 2015; Matasci et al., 2018; Stahl et al., 2023). Обусловлено это во многом наличием рядов снимков за многие десятилетия, что позволяет учесть разные аспекты при анализе нарушенности лесопокрытых земель.

Вместе с тем проблема изучения типов нарушений, обусловленных различными факторами, остаётся во многом открытой. Связно это с разнообразием лесного покрова по породному составу и особенностями самих факторов, оказывающих негативное влияние. Анализ этой проблемы требует учёта особенностей лесов конкретных природных зон и причин нарушений. Актуальной соответствующая задача остаётся и для лесов лесостепной зоны.

Лесопокрытые земли Среднерусской лесостепи представлены в значительной степени широколиственными лесами (Камышев, Хмелев, 1976; Бугаев и др., 2013), среди которых доминируют дубовые леса (Рубцов, 1966; Бугаев и др., 2004). До середины XX в. отмечалась тенденция к снижению их площади (Дегтярь, Григорьева, 2018; Lisetskii, Buryak, 2023).

К распространённым типам нарушений в широколиственных лесах Среднерусской лесостепи относятся сплошные рубки, влияние болезней, воздействие насекомых-вредителей. Примерами болезней являются поперечный рак дуба, трутовик ложный дубовый, зелёная дубовая листовёртка. Сплошные рубки в лесах региона проводились на протяжении столетий. Но с конца XX в. характерна тенденция к уменьшению их масштабов. Распространение нарушений из-за болезней деревьев и насекомых-вредителей обусловлено как естественными причинами, так и снижением устойчивости дубрав вследствие рубок, проводившихся многие годы. Леса региона длительное время выступали объектом лесозаготовок (Цветков, 1957; Царалунга, 2002), в результате которых часто вырубались наиболее высокопродуктивные деревья. Их рубки могли выступать одной из причин снижения устойчивости дубрав к воздействию негативных факторов (Харченко, Харченко, 2007).

Цель исследования состояла в оценке влияния различных типов нарушенности в широколиственных лесах Среднерусской лесостепи на их спектрально-отражательные характеристики. Задачи исследования включали оценку различий отражательных свойств для типов нарушений в лесах; выявление участков спектра, в которых типы нарушений характеризуются наибольшими различиями; исследование многолетней динамики спектрально-отражательных характеристик для каждого типа нарушенности и их сравнение с аналогичной динамикой лесов без нарушений верхних ярусов.

Материалы и методика исследования

Для исследования спектрально-отражательных характеристик различных типов нарушений широколиственных лесов сформирована выборка из более 270 участков (*табл. 1*), расположенных на территории Белгородской, Курской, Воронежской и Липецкой областей.

Выявление участков нарушенных лесов осуществлено методом совместного анализа материалов лесоустройства, многозональных спутниковых данных Landsat TM (*англ. Thematic Mapper*) 1984–2011 гг., снимков сверхвысокого пространственного разрешения и результатов полевых обследований. Анализируемые участки представляли отдельные лесотаксационные выделы, либо их части. Подбор объектов проводили таким образом, чтобы обеспечить возможность корректного сравнения всех исследуемых типов нарушений за аналогичные сроки, и, одновременно, исследования их многолетней динамики. Исходя из этого был выбран год, на который было осуществлено сравнение типов нарушенности — 2011 г. Анализируемые типы нарушений включали участки сплошных рубок 2005–2006 гг. и участки,

нарушенные болезнями деревьев или насекомыми-вредителями в течение первых двух десятилетий XXI в.

Таблица 1. Параметры участков, на основе данных с которых изучено влияние типов нарушений широколиственных лесов на их спектрально-отражательные характеристики

Тип нарушения	Число участков	Площадь средняя, га	Площадь общая, га
Сплошные рубки	87	1,2	103,2
Насекомые-вредители	20	9,7	193,4
Болезни деревьев	103	6,6	681,2
Участки без нарушений	64	11,1	712,7
Всего:	274	6,2	1690,5

Выборку формировали таким образом, чтобы репрезентативно представлять каждый тип нарушенности и одновременно участки лесов без нарушений верхних ярусов. Использование многолетних рядов снимков обусловлено тем, что влияние некоторых факторов, например болезней деревьев, на верхние части лесного полога и его спектрально-отражательные характеристики может проявляться не сразу, а на протяжении определённого интервала времени.

Формирование выборки для анализа типов нарушенности в лесах осуществлено с учётом следующих критериев:

1. Участки нарушений должны быть представлены широколиственными лесами, в которых дуб является основной породой.
2. Возраст лесов на участках нарушенности, за исключением участков сплошных рубок, должен быть аналогичен. Для анализа, исходя из этого, подбирали леса с возрастом преимущественно от 60 до 80 лет, что соответствует наиболее распространённому классу возраста дубрав региона.
3. На анализируемые участки нарушений должен быть доступен многолетний ряд безоблачных многозональных фрагментов снимков с одного и того же сенсора, полученных в аналогичные сроки года для минимизации влияния фактора фенологических различий.
4. Анализируемые участки должны находиться в максимально идентичных лесорастительных условиях, вдали от территорий повышенного увлажнения.

Для каждого типа нарушения сформирован с использованием геоинформационных средств векторный контур с возможностью заполнения атрибутивной составляющей о наборе параметров, к которым относятся породный состав, возраст, тип нарушения, тип лесорастительных условий, спектрально-отражательные свойства в различных диапазонах спектра в период последних десятилетий XX – первых десятилетий XXI в.

Для анализа спектрально-отражательных характеристик использованы разновременные снимки Landsat TM, которые позволяют исследовать многолетнюю динамику отражательных свойств лесных сообществ с одного и того же сенсора за максимально возможный период, охватывающий несколько десятилетий. В дополнение к снимкам Landsat TM использованы данные Landsat ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus), которые были применены для увеличения продолжительности многолетнего ряда до 2018 г. Диапазоны большинства каналов Landsat ETM+ аналогичны диапазонам Landsat TM, но их использование ограничено отсутствием части информации на изображениях с 2003 г.

Оценка отражательной способности включала анализ коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) лесных участков на аналогичные сроки (август 2011 г.) и многолетних рядов их спектрально-отражательных свойств за 1984–2018 гг., т.е. самый длительный период, за который имелась возможность построения рядов снимков Landsat TM с дополнением снимками Landsat ETM+. Для анализа сформирован набор разновременных снимков Landsat TM

(источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>), включающий изображения, отобранные за один и тот же месяц года — август, являющийся наименее облачным в году для региона исследования.

Подбор данных преимущественно одного месяца выполнен для минимизации влияния фактора фенологических различий. Многолетний ряд включал снимки, полученные 10.08.1984, 29.08.1985, 21.08.1988, 24.08.1989, 16.08.1992, 25.08.1995, 11.08.1996, 01.08.1998, 22.08.2000, 25.08.2001, 31.08.2003, 16.08.2006, 10.08.2007, 12.08.2008, 01.07.2010 и 31.08.2011. С учётом данных Landsat ETM+ ряд включал также снимки от 18.08.2013, 24.08.2015, 13.08.2017 и 16.08.2018.

Снимки Landsat отбирались на близкие ячейки в системе WRS-2 (*англ.* World Reference System-2), используемой для определения местоположения данных Landsat TM на земной поверхности, и имели параметры Path (колонка) 177, Row (Ряд) 24 и Path 176, Row 24. Все изображения прошли атмосферную и радиометрическую коррекцию и были пересчитаны в безразмерные коэффициенты спектральной яркости, принимающие значения от 0 до 1. Значения отражательной способности изучены в шести участках спектра. Они охватывали синий (*англ.* Blue) диапазон, зелёный (*англ.* Green), красный (*англ.* Red), ближний инфракрасный (ИК) (*англ.* Near-InfraRed — NIR) и два коротковолновых ИК (*англ.* Short Wave InfraRed — SWIR1, 2) диапазона. Сравнение спектрально-отражательных характеристик различных типов нарушенности лесов на аналогичные сроки осуществлено отдельно в каждой спектральной зоне. На этом этапе рассчитаны и сопоставлены между собой статистические параметры (среднее, коэффициент вариации) разных типов нарушений и ненарушенных лесов. Рабочая гипотеза исследования состояла в том, что в наиболее информативных спектральных диапазонах должна наблюдаться закономерность в изменении спектрально-отражательных характеристик в зависимости от типа нарушений. Наиболее сильные повреждения верхних ярусов характерны для сплошных рубок. Далее следуют участки, повреждённые энтомовыми вредителями и болезнями деревьев. Во всех случаях проведён сопоставительный анализ с лесами без нарушений.

После оценки статистических параметров типов нарушенности изучены особенности многолетней динамики спектрально-отражательных характеристик каждого из них. Оценка многолетних рядов включала их графический анализ, оценку наличия или отсутствия тренда, его статистическую значимость, время, с которого начинали наблюдаться изменения, обусловленные воздействием нарушающего фактора.

Результаты и их обсуждение

Для широколиственных лесов региона в диапазонах NIR- и SWIR-спектра в ряду «сплошные рубки — влияние энтомологических вредителей — влияние болезней — ненарушенные леса» (*рис. 1*, см. с. 165) наблюдается последовательное снижение абсолютных значений спектрально-отражательных характеристик (коэффициентов спектральной яркости). Оно обусловлено уменьшением величины воздействия нарушений на верхние ярусы леса. В диапазонах видимого спектра (синий, зелёный, красный каналы) наиболее высокие значения отражательной способности характерны для участков, нарушенных энтомовыми вредителями, наиболее низкие значения — для нарушений болезнями деревьев. Определённой закономерности изменения спектрально-отражательных характеристик, обусловленной величиной воздействия нарушений на верхние ярусы леса, таким образом, в видимой части спектра не наблюдается, так как фактическая наибольшая величина нарушенности характерна для участков сплошных рубок.

Нарушенность лесных сообществ приводит к изреживанию лесного полога вследствие гибели групп или отдельных деревьев, что проявляется и в спектрально-отражательных характеристиках. Снижение их значений в этих диапазонах для участков нарушений происходит по мере уменьшения величины воздействия нарушающих факторов, из которых наиболее значительным в дубравах являются сплошные рубки, наименее существенным — влияние болезней.

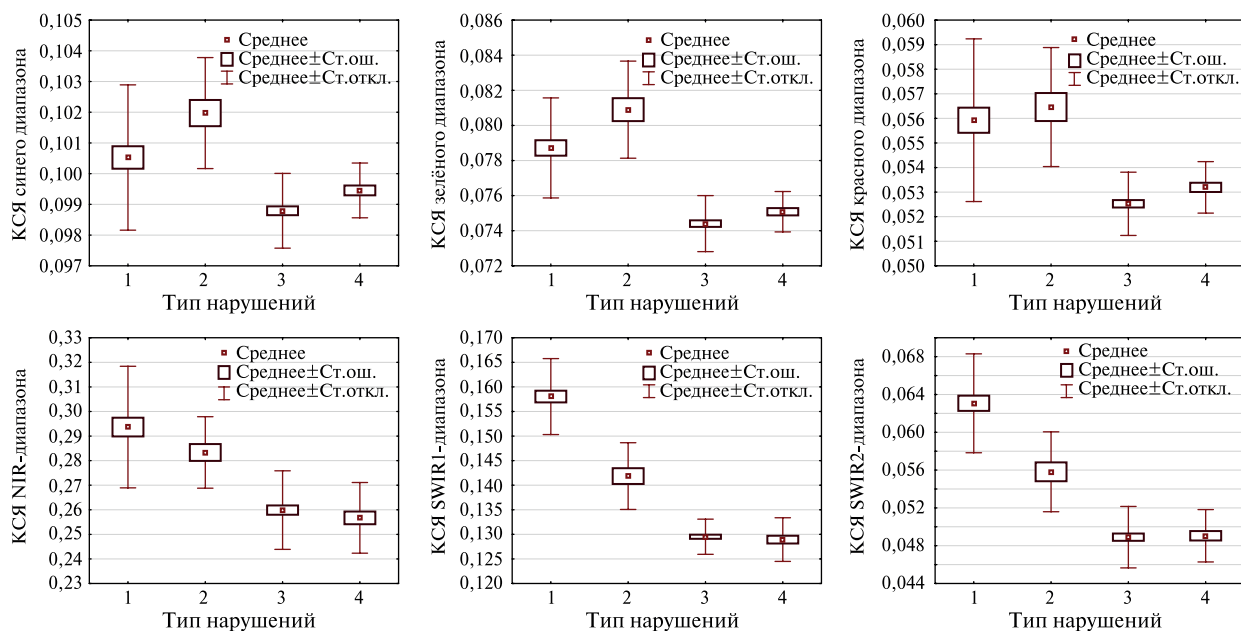


Рис. 1. Параметры спектрально-отражательных характеристик различных типов нарушений в широколиственных лесах и лесах без нарушений верхних ярусов: 1 — рубки, 2 — воздействие энтомовредителей, 3 — воздействие болезней деревьев, 4 — леса без нарушений

Показателем нарушения лесов может выступать с определёнными ограничениями повышение вариации их отражательных признаков. Для участков, нарушенных сплошными рубками, во всех диапазонах спектра наблюдаются заметно более высокие значения коэффициента вариации спектрально-отражательных характеристик (табл. 2) в сравнении с ненарушенными лесами. Для участков нарушений вследствие воздействия энтомовредителей или болезней деревьев более высокие коэффициенты вариации спектрально-отражательных характеристик в сравнении с ненарушенными лесами также присутствуют, но их различия с ненарушенными лесами выражены слабее.

Таблица 2. Параметры спектрально-отражательных характеристик типов нарушений в широколиственных лесах на основе данных Landsat TM

Диапазоны Landsat TM	Тип нарушения							
	Сплошные рубки		Насекомые-вредители		Болезни деревьев		Ненарушенные леса	
	Среднее	V, %	Среднее	V, %	Среднее	V, %	Среднее	V, %
Blue	0,101	2,4	0,102	1,8	0,099	1,2	0,099	0,9
Green	0,079	3,6	0,081	3,4	0,074	2,1	0,075	1,5
Red	0,056	5,9	0,056	4,3	0,053	2,5	0,053	2,0
NIR	0,294	8,4	0,283	5,1	0,260	6,1	0,257	5,6
SWIR1	0,158	4,9	0,142	4,8	0,130	2,8	0,129	3,4
SWIR2	0,063	8,3	0,056	7,6	0,049	6,6	0,049	5,6

Примечание: V — коэффициент вариации.

Немаловажным критерием различных типов нарушений в лесах является статистическая значимость различий их спектрально-отражательных характеристик. При этом такая оценка целесообразна только для тех диапазонов спектра, в которых наблюдается определённая закономерность отражательных свойств лесов в ряду «сплошные рубки — влияние энтомовредителей — влияние болезней — ненарушенные леса».

В NIR- и SWIR-каналах статистически значимые различия на уровне 0,05, установленные на основе дисперсионного анализа и наименьшей существенной разности, наблюдаются между всеми изученными типами нарушений в широколиственных лесах. При этом статистически значимых различий между лесами, нарушенными болезнями (рак дуба поперечный, трутовик ложный дубовый), и лесами без нарушений верхних ярусов не выявлено ни в одном диапазоне. Интерпретировать полученные данные можно следующим образом: наличие статистически значимых различий между типами нарушений в широколиственных лесах по их спектрально-отражательным характеристикам в NIR- и SWIR-диапазонах выступает основанием для их применения в целях выявления и изучения соответствующих типов нарушенности. Вместе с тем отсутствие статистически значимых различий по коэффициентам спектральной яркости между лесами, нарушенными болезнями, и ненарушенными насаждениями будет осложнять реализацию соответствующего подхода.

Учитывая, что некоторые типы негативных факторов оказывают воздействие на лесные сообщества на протяжении длительного времени, более развёрнутое представление об особенностях их спектрально-отражательных характеристик может быть получено на основе анализа многолетних рядов значений. Они были изучены на примере спектрально-отражательных характеристик коротковолнового ИК-спектра, показавших на предыдущем этапе наибольшую чувствительность к различиям в типах нарушенности широколиственных лесов. Многолетний ряд отражательных характеристик каждого типа нарушенности был сопоставлен с аналогичным рядом для лесных сообществ без нарушений.

Нарушения в широколиственных лесах, проявляющиеся в верхних ярусах, независимо от их типа обуславливают повышение коэффициентов спектральной яркости в SWIR-диапазоне. Сплошные рубки, приводящие к сведению подавляющей части деревьев, кардинально меняют спектрально-отражательные характеристики участка, где располагался лес, увеличивая отражательную способность более чем на 60 % в год проведения рубки (рис. 2, см. с. 167). Из графика видно, что в год рубки, в данном случае в 2005–2006 гг., спектрально-отражательные характеристики коротковолновой ИК-области резко повышаются в сравнении с предыдущим периодом. В последующие годы, вследствие того что на большинстве рубок в широколиственных лесах региона практически сразу же начинается лесовозобновление, формируется тенденция к снижению отражательной способности.

Нарушения, обусловленные энтомовыми вредителями и болезнями, воздействие которых на древостой протекает на протяжении нескольких лет (в случае настоящего исследования — первые десятилетия XXI в.), определяют наличие положительного многолетнего тренда в спектрально-отражательных характеристиках. При этом изменения в коэффициентах спектральной яркости этих типов нарушений значительно меньше, чем у участков сплошных рубок. Многолетняя динамика спектрально-отражательных характеристик SWIR-диапазона позволяет установить время, в которое влияние фактора болезней деревьев начало проявляться в древостое. Оно определяется сроками, с которых начинает наблюдаться тенденция к повышению спектральной отражательной способности. Вместе с тем из сопоставления величины спектрально-отражательных характеристик SWIR-диапазона в конкретный год для различных типов нарушений в лесах (см. рис. 2) можно получить представления о различиях в величине воздействия негативных факторов.

В условиях отсутствия воздействия нарушающих факторов на лесное сообщество происходит повышение возраста леса, которое для молодых и средневозрастных насаждений формирует выраженный тренд к снижению отражательной способности, а для приспевающих и спелых лесов — слабовыраженную отрицательную тенденцию спектрально-отражательных характеристик, либо отсутствие тренда.

Для индикации тенденции, связанной с ухудшением состояния насаждений вследствие воздействия негативных факторов, предложено использовать критерий τ Манна–Кендалла, вычисляемый на основе многолетних рядов спектрально-отражательных характеристик SWIR-диапазона для конкретных участков леса, которыми могут выступать таксационные выделы. Показатель τ Манна–Кендалла является непараметрическим критерием наличия или отсутствия непрерывной статистически значимой тенденции.

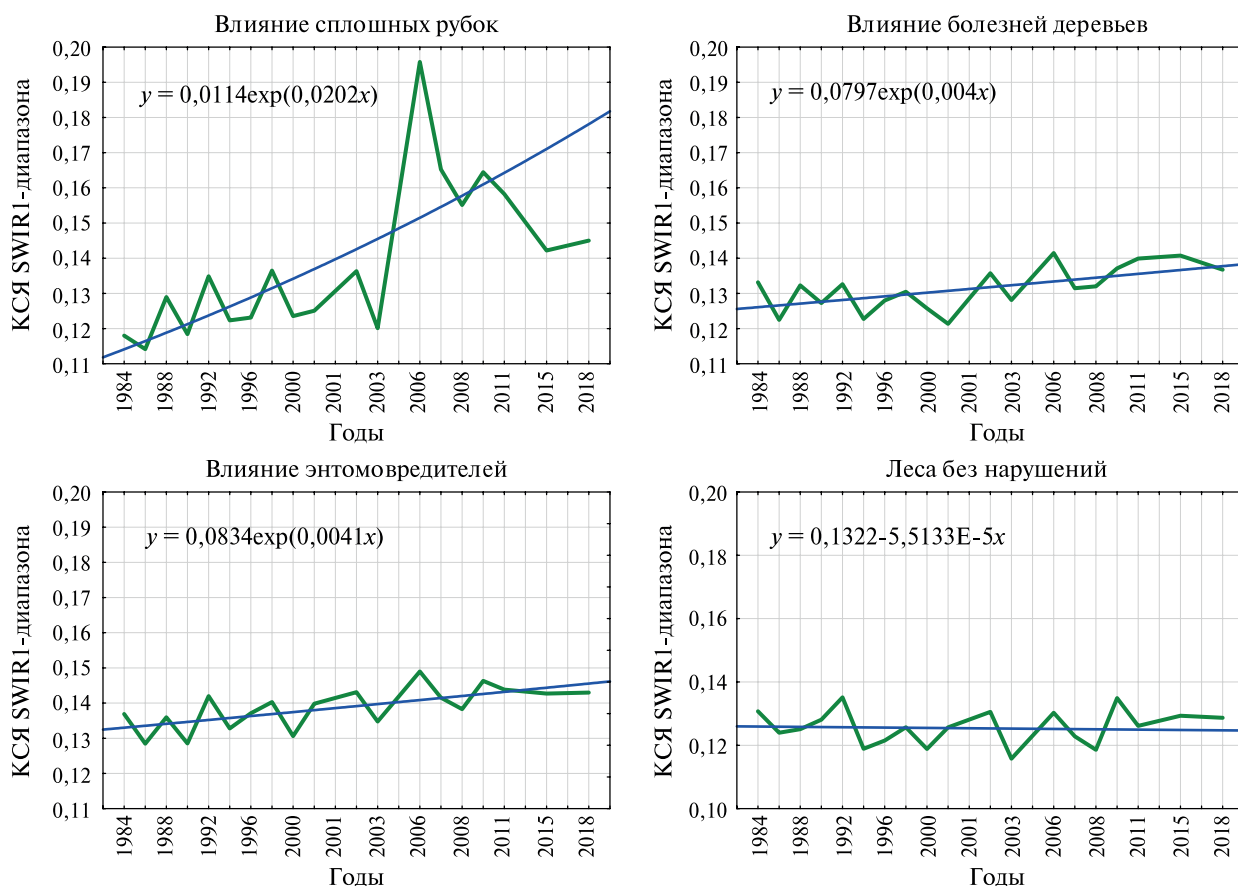


Рис. 2. Примеры многолетней динамики коэффициентов спектральной яркости коротковолнового ИК-диапазона (август) для различных типов нарушений в широколиственных лесах. Годы сплошных рубок — 2005–2006. Период воздействия болезней деревьев и насекомых-вредителей — начало XXI в.

Таблица 3. Параметры tau Манна–Кендалла для многолетней (1984–2011) динамики спектрально-отражательных свойств типов нарушения широколиственных лесов в каналах видимого диапазона по данным Landsat TM

Фактор нарушения	Спектральные диапазоны					
	Blue		Green		Red	
	tau	p-value	tau	p-value	tau	p-value
Рубки	-0,111	0,52	-0,029	0,88	-0,056	0,77
Насекомые-вредители	-0,292	0,88	-0,005	0,99	-0,076	0,67
Болезни деревьев	-0,123	0,48	-0,053	0,77	-0,123	0,48
Без нарушений	-0,053	0,78	-0,041	0,83	-0,029	0,88

Примечание: p-value — уровень значимости.

В диапазонах видимого спектра (синий, зелёный и красный каналы) тренда коэффициентов спектральной яркости не наблюдается. Во всех случаях параметр tau статистически не значим (табл. 3). Параметры многолетней динамики спектрально-отражательных характеристик в этих каналах для различных типов нарушений в лесах не отличаются от параметров многолетней динамики лесов без нарушений. Для неё также характерно отсутствие статистически значимого тренда. Таким образом, и в случае анализа на единовременный срез, и при оценке многолетней динамики спектрально-отражательных характеристик (по данным Landsat TM) диапазоны видимого спектра показали невысокую чувствительность к типам нарушения широколиственных лесов.

Для рядов спектрально-отражательных характеристик ИК-диапазонов (ближний и коротковолновые инфракрасные) всех типов нарушений в широколиственных лесах свойственны положительные значения τ Манна–Кендалла, многие из которых статистически значимы на уровне 0,05 (табл. 4). Положительные статистически значимые значения отмечаются для многолетних рядов спектрально-отражательных характеристик в диапазонах SWIR1, 2 (1,55–1,75; 2,08–2,35 мкм). Вместе с тем они наблюдаются и для аналогичных характеристик ближнего ИК-спектра. При этом многолетняя динамика спектрально-отражательных характеристик лесов без нарушений во всех каналах ИК-области статистически незначима.

Из данных в таблице видно, что по параметрам многолетней динамики спектрально-отражательных характеристик в ближнем ИК- и первом коротковолновом ИК-диапазонах наблюдается последовательное снижение величины τ Манна–Кендалла в ряду типов нарушений «рубки – насекомые-вредители – болезни деревьев» с одновременным уменьшением её статистической значимости.

Таблица 4. Параметры τ Манна – Кендалла для многолетней (1984–2011) динамики спектрально-отражательных свойств типов нарушенности широколиственных лесов в каналах ИК-диапазона по данным Landsat TM

Фактор нарушенности	Спектральные диапазоны					
	NIR		SWIR1		SWIR2	
	τ	p -value	τ	p -value	τ	p -value
Рубки	0,532	0,00	0,474	0,00	0,359	0,04
Насекомые-вредители	0,427	0,01	0,380	0,02	0,059	0,76
Болезни деревьев	0,310	0,07	0,240	0,16	0,242	0,17
Без нарушений	–0,064	0,72	–0,087	0,62	0,006	0,99

Исследование многолетней динамики различных типов нарушений в широколиственных лесах Среднерусской лесостепи, таким образом, показало её возможности как показателя различия типов нарушенности в лесопокрытых землях. С другой стороны, применяемый подход имеет и ряд ограничений. Первое из них заключается в необходимости формирования многолетних рядов снимков одного и того же месяца, что далеко не всегда возможно для территорий с относительно большим числом облачных дней в году. Второе ограничение связано с относительно низкими различиями спектрально-отражательных характеристик участков лесов, нарушенных болезнями деревьев, в сравнении с участками без нарушений верхних ярусов. Проведение соответствующих исследований требует и формирования рядов однотипных спутниковых данных, полученных одной и той же аппаратурой.

Учитывая, что влияние болезней деревьев и насекомых-вредителей в широколиственных лесах приводит к относительно небольшим (в сравнении с рубками) изменениям их спектрально-отражательных характеристик, большее значение будет иметь высокая радиометрическая разрешающая способность спутникового сенсора в сочетании с достаточным пространственным разрешением. В этом плане перспективы соответствующих исследований связаны с накоплением многолетних рядов данных с приборов, обладающих необходимыми характеристиками, в первую очередь, Sentinel-2 MSI (англ. Multispectral Instrument).

Выводы

Наиболее распространённые типы нарушенности широколиственных лесов Среднерусской лесостепи характеризуются последовательным снижением коэффициентов спектральной яркости ближнего и коротковолнового ИК-диапазонов в ряду «сплошные рубки – влияние энтомовредителей – влияние болезней – ненарушенные леса». Соответствующая закономер-

ность отражает уменьшение величины воздействия негативных факторов на верхние ярусы лесных сообществ. В каналах ближнего и коротковолнового ИК-спектра между всеми типами нарушений характерны статистически значимые различия. При этом участки лесов, нарушенные болезнями деревьев (например трутовиком ложным дубовым, раком дуба поперечным), по спектрально-отражательным характеристикам статистически значимо не отличаются от лесов без нарушений верхних ярусов. Появление нарушений вследствие сплошных рубок обуславливает более чем 50%-е увеличение спектрально-отражательных характеристик в коротковолновой ИК-области. Нарушения вследствие воздействия насекомых-вредителей или болезней, в случае их проявления в верхних ярусах, обуславливают формирование плавного положительного тренда в коэффициентах спектральной яркости коротковолнового ИК-диапазона.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-17-00169, <https://rscf.ru/project/23-17-00169/>.

Литература

1. *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.
2. *Бугаев В.А., Мусиевский А.Л., Царалунга В.В.* Дубравы Европейской части России // Изв. высш. учебных заведений. Лесной журн. 2004. № 2. С. 7–13.
3. *Бугаев В.А., Мусиевский А.Л., Царалунга В.В.* Дубравы лесостепи. Воронеж: Воронежская гос. лесотехн. акад. 2013. 247 с.
4. *Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Полевщикова Ю.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. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134.
5. *Дегтярь А.В., Григорьева О.И.* Изменение лесистости Белгородской области за 400-летний период // Научн. ведомости Белгородского гос. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2018. Т. 42. № 4. С. 574–586. DOI: 10.18413/2075-4671-2018-42-4-574-586.
6. *Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Шуляк П.П., Честных О.В.* Влияние пожаров и заготовок древесины на углеродный баланс лесов России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 36–49.
7. *Камышев Н.С., Хмелев К.Ф.* Растительный покров Воронежской области и его охрана. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та. 1976. 181 с.
8. *Рубцов В.И.* Леса Центрально-Черноземного района // Леса СССР. Т. 3: Леса Европейской части СССР и Закавказья. М.: Наука, 1966. С. 107–140.
9. *Терехин Э.А.* Распознавание нарушенных лесных экосистем лесостепи на основе спектрально-отражательных характеристик // Компьютер. оптика. 2019. Т. 43. № 3. С. 412–418. DOI: 10.18287/0134-2452-2019-43-3-412-418.
10. *Терехин Э.А.* Оценка нарушенности лесов лесостепной зоны в начале XXI века по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 134–146. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-134-146.
11. *Харченко Н.А., Харченко Н.Н.* К вопросу о деградации порослевых дубрав Центрального Черноземья // Вестн. Московского гос. ун-та леса — Лесной вестн. 2007. № 4. С. 29–31.
12. *Царалунга В.В.* Ущерб, нанесенный воронежским дубравам строительством Белгородской черты // Вестн. Центрально-Черноземного регион. отд-ния наук о лесе Российской акад. естеств. наук Воронежской гос. лесотехн. акад. 2002. Т. 4. № 1. С. 132–137.
13. *Цветков М.А.* Изменение лесистости Европейской России с конца XVII столетия по 1914 год. М: Изд-во АН СССР, 1957. 2013 с.
14. *Шорохова Е.В., Корепин А.А., Капица Е.А. и др.* Ценолитическое разнообразие и долговременная динамика массива «Вепсский лес» // Лесоведение. 2022. № 6. С. 643–657. DOI: 10.31857/S0024114822060109.
15. *Bullock E. L., Woodcock C. E., Olofsson P.* Monitoring tropical forest degradation using spectral unmixing and Landsat time series analysis // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 238. Article 110968. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.011.

16. DeVries B., Decuyper M., Verbesselt J. et al. Tracking disturbance-regrowth dynamics in tropical forests using structural change detection and Landsat time series // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 169. P. 320–334. DOI: 10.1016/j.rse.2015.02.012.
17. Frantz D., Röder A., Udelhoven T. et al. Forest disturbance mapping using dense synthetic Landsat/MODIS time-series and permutation-based disturbance index detection // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. No. 4. Article 277. DOI: 10.3390/rs8040277.
18. Frolking S., Palace M. W., Clark D. B. et al. Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure // *J. Geophysical Research*. 2009. V. 114. Iss. G2. Article G00E02. 27 p. DOI: 10.1029/2008JG000911.
19. Huang C., Goward S. N., Masek J. G. et al. An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. No. 1. P. 183–198. DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.017.
20. 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. V. 114. No. 12. P. 2897–2910. DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008.
21. Lisetskii F. N., Buryak Z. A. Runoff of water and its quality under the combined impact of agricultural activities and urban development in a small river basin // *Water*. 2023. V. 13 No. 15. Article 2443. DOI: 10.3390/w15132443.
22. Matasci G., Hermosilla T., Wulder M. A. et al. Three decades of forest structural dynamics over Canada's forested ecosystems using Landsat time-series and lidar plots // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 216. P. 697–714. DOI: 10.1016/j.rse.2018.07.024.
23. Slagter B., Reiche J., Marcos D. et al. Monitoring direct drivers of small-scale tropical forest disturbance in near real-time with Sentinel-1 and -2 data // *Remote Sensing of Environment*. 2023. V. 295. Article 113655. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113655.
24. Stahl A. T., Andrus R., Hicke J. A. et al. Automated attribution of forest disturbance types from remote sensing data: A synthesis // *Remote Sensing of Environment*. 2023. V. 285. Article 113416. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113416.
25. Yuan Q., Shen H., Li T. et al. Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 241. Article 111716. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111716.
26. Zhao F., Huang C., Goward S. N. et al. Development of Landsat-based annual US forest disturbance history maps (1986–2010) in support of the North American Carbon Program (NACP) // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 209. P. 312–326. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.035.

Patterns of influence of disturbance types in forest-steppe broad-leaved forests on spectral reflectance

E. A. Terekhin

*Belgorod State University, Belgorod 308015, Russia
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

Disturbance is key indicator of forest condition. The article explores the influence of disturbances, such as tree diseases, insect pests, clear-cutting, in broad-leaved forests of Central Russian forest-steppe on their satellite-derived spectral reflectance. The sequence “clear cuttings—influence of insect pests— influence of diseases—undisturbed forests” shows a consistent decrease in the near and short-wave infrared reflectance. It is due to a decrease in the magnitude of the impact of the negative factor. No similar patterns have been identified for visible range reflectance. In the near and short-wave infrared ranges, statistically significant differences are observed between all forest disturbance types. At the same time, significant differences between areas of disturbance due to tree diseases from undisturbed forests were not established in any range. The influence of insect pests and tree diseases forms a positive trend in the short-wave infrared reflectance. The presence of the trend is a criterion of the corresponding forest disturbance types. Clear cuttings result in a 50–60 % increase in short-wave infrared reflectance. The absence of disturbances in forests forms a negative reflectance trend or absence of a pronounced trend, depending on forest age.

Keywords: forest disturbance, broad-leaved forests, Landsat, remote sensing data, time series

Accepted: 01.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-161-172

References

1. Bartalev S. A., Kuryatnikova T. S., Stibig H.-J., Methods for the analysis of time-series of high-resolution satellite images for the assessment of logging in the taiga, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, No. 2, pp. 217–227 (in Russian).
2. Bugaev V. A., Musievsky A. L., Tsaralunga V. V. Oak forests in the European part of Russia, *Russian Forestry J.*, 2004, No. 2, pp. 7–13 (in Russian).
3. Bugaev V. A., Musievsky A. L., Tsaralunga V. V., *Dubravyye lesostepi* (Oak forests of the forest-steppe), Voronezh: Voronezhskaya gosudarstvennaya lesotekhnicheskaya akademiya, 2013, 247 p. (in Russian).
4. Vorobiev O. N., Kurbanov E. A., Polevshchikova Y. A., Lezhnin S. A., 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 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134.
5. Degtyar A. V., Grigoreva O. I., Development of land forests of the Belgorod region for the 400-year period, *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki*, 2018, Vol. 42, No. 4, pp. 574–586 (in Russian), DOI: 10.18413/2075-4671-2018-42-4-574-586.
6. Zamolodchikov D. G., Grabovsky V. I., Shulyak P. P., Chestnykh O. V., The impacts of fires and clear-cuts on the carbon balance of Russian forests, *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, Vol. 6, No. 3, pp. 714–726, DOI: 10.1134/S1995425513070123.
7. Kamyshev N. S., Khmelev K. F., *Rastitel'nyi pokrov Voronezhskoi oblasti i ego okhrana* (Vegetation cover of the Voronezh region and its protection), Voronezh: Izd. Voronezhskogo universiteta, 1976, 181 p. (in Russian).
8. Rubtsov V. I., Forests of the Central Chernozem region, *Lesy SSSR. T. 3: Lesy Evropeiskoi chasti SSSR i Zakavkaz'ya* (Forests of the USSR. Vol. 3 : Forests of the European part of the USSR and Transcaucasia), Moscow: Nauka, 1966, pp. 107–140 (in Russian).
9. Terekhin E. A., Detection of disturbed forest ecosystems in the forest-steppe zone using reflectance values, *Computer Optics*, 2019, Vol. 43, No. 3, pp. 412–418 (in Russian), DOI: 10.18287/0134-2452-2019-43-3-412-418.
10. Terekhin E. A., Estimation of forest disturbance in the forest-steppe zone at the beginning of the XXI century using satellite data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 134–146 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-134-146.
11. Harchenko N. A., Harchenko N. N., To question about degrade sprouts oak wood Central Chernozem, *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoi vestnik*, 2007, No. 4, pp. 29–31 (in Russian).
12. Tsaralunga V. V., Damage caused to Voronezh oak forests by the construction of the Belgorod Line, *Vestnik Tsentral'no-Chernozemnogo regional'nogo otdeleniya nauk o lese Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk Voronezhskoi gosudarstvennoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2002, Vol. 4, No. 1, pp. 132–137 (in Russian).
13. Tsvetkov M. A., *Izmenenie lesistosti evropeiskoi Rossii s kontsa XVII stoletiya po 1914 god* (Changes in forest cover in European Russia from the end of the 17th century to 1914), Moscow: Izd. AN SSSR, 1957, 213 p.
14. Shorokhova E. V., Korepin A. A., Kapitsa E. A. et al., Cenotic diversity and the long-term dynamics of the primeval middle boreal forests, *Lesovedenie*, 2022, No. 6, pp. 643–657 (in Russian), DOI: 10.31857/S0024114822060109.
15. Bullock E. L., Woodcock C. E., Olofsson P., Monitoring tropical forest degradation using spectral unmixing and Landsat time series analysis, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 238, Article 110968, DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.011.
16. DeVries B., Decuyper M., Verbesselt J. et al., Tracking disturbance-regrowth dynamics in tropical forests using structural change detection and Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 169, pp. 320–334, DOI: 10.1016/j.rse.2015.02.012.
17. Frantz D., Röder A., Udelhoven T. et al., Forest disturbance mapping using dense synthetic Landsat/MODIS time-series and permutation-based disturbance index detection, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 4, Article 277, DOI: 10.3390/rs8040277.
18. Frohling S., Palace M. W., Clark D. B. et al., Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114, Issue G2, 27 p., DOI: 10.1029/2008JG000911.

19. Huang C., Goward S. N., Masek J. G. et al., An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, No. 1, pp. 183–198, DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.017.
20. 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, DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008.
21. Lisetskii F. N., Buryak Z. A., Runoff of water and its quality under the combined impact of agricultural activities and urban development in a small river basin, *Water*, 2023, Vol. 13, No. 15, Article 2443, DOI: 10.3390/w15132443.
22. Matasci G., Hermosilla T., Wulder M. A. et al., Three decades of forest structural dynamics over Canada's forested ecosystems using Landsat time-series and lidar plots, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 216, pp. 697–714, DOI: 10.1016/j.rse.2018.07.024.
23. Slagter B., Reiche J., Marcos D. et al., Monitoring direct drivers of small-scale tropical forest disturbance in near real-time with Sentinel-1 and -2 data, *Remote Sensing of Environment*, 2023, Vol. 295, Article 113655, DOI: 10.1016/j.rse.2023.113655.
24. Stahl A. T., Andrus R., Hicke J. A. et al., Automated attribution of forest disturbance types from remote sensing data: A synthesis, *Remote Sensing of Environment*, 2023, Vol. 285, Article 113416, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113416.
25. Yuan Q., Shen H., Li T. et al., Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 241, Article 111716, DOI: 10.1016/j.rse.2020.111716.
26. Zhao F., Huang C., Goward S. N. et al., Development of Landsat-based annual US forest disturbance history maps (1986–2010) in support of the North American Carbon Program (NACP), *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 209, pp. 312–326, DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.035.