

Оценка влияния типов нарушения хвойных лесов лесостепи на спектрально-отражательные характеристики

Э. А. Терехин

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга
объектов и природных ресурсов, Белгород, 308015, Россия
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

Нарушенность лесных экосистем выступает одним из ключевых факторов, влияющих на состояние лесов, их возрастную структуру и биометрические параметры. Представлены результаты исследования спектрально-отражательных характеристик различных типов нарушений в хвойных лесах Среднерусской лесостепи: участков, пройденных пожарами, нарушенных в результате воздействия болезней деревьев, насекомых-вредителей. Появление нарушений приводит к повышению абсолютных значений отражательной способности в большинстве участков спектра, за исключением ближнего инфракрасного (*англ.* near infrared — NIR) диапазона. Повышение нарушенности лесов также обуславливает увеличение вариации спектрально-отражательных характеристик. В ряду «пирогенные нарушения — повреждения болезнями — повреждения насекомыми-вредителями — ненарушенные участки» установлена закономерность снижения отражательных характеристик в красном и коротковолновом инфракрасном (*англ.* short wave infrared — SWIR) диапазонах. В ближнем инфракрасном диапазоне выявлена обратная закономерность. Постпирогенные участки характеризуются статистически значимыми отличиями по спектрально-отражательным свойствам в видимой и инфракрасной областях от всех остальных типов нарушений. Участки, нарушенные в результате воздействия болезней деревьев, характеризуются статистически значимым многолетним трендом увеличения коэффициентов спектральной яркости, проявляющемся в SWIR-диапазонах и отсутствующем в других каналах. Для нарушений, обусловленных воздействием насекомых-вредителей, не выявлено статистически значимых многолетних изменений в спектрально-отражательных характеристиках.

Ключевые слова: нарушение лесов, спектрально-отражательные характеристики, дистанционное зондирование, Среднерусская лесостепь, Landsat

Одобрена к печати: 25.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-164--175

Введение

Нарушенность лесных экосистем является одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на их возрастную структуру, наземную фитомассу и ряд других характеристик. В этой связи разработка подходов к индикации участков нарушенных лесов и их геоинформационному картографированию остаётся одной из наиболее актуальных задач в исследованиях лесных экосистем с использованием данных дистанционного зондирования Земли (Швецов, 2022; Barta et al., 2022; Stahl et al., 2023).

Регулярно получаемые спутниковые данные в настоящее время уже выступают основой в системах глобального и регионального мониторинга нарушенности в лесах (Hansen et al., 2013; Lu et al., 2022; Tran et al., 2016; White et al., 2017). Одновременно многозональная спутниковая информация становится практически безальтернативным источником для её ретроспективных исследований (Воробьев и др., 2016; Long et al., 2023; Potapov et al., 2015; Zhao et al., 2018). Достаточно широко данные дистанционного зондирования применяются в исследованиях нарушенности вследствие пожаров (Лупян и др., 2022; Стыценко и др., 2019; Gale et al., 2021) и сплошных лесосечных рубок (Барталев и др., 2005; Borrelli et al., 2014; Schroeder et al., 2011; Woodward et al., 2017). Основная часть исследований в этой области направлена на идентификацию и геоинформационное картографирование таких участков. Вместе с этим, несмотря на интенсивно растущее применение снимков в разработке под-

ходов к мониторингу нарушенности лесов, во многом остаётся открытым вопрос типизации участков нарушений по факторам, обуславливающим её. К ним относятся воздействие пожаров, болезней деревьев, насекомых-вредителей и др. Решение соответствующей задачи, в свою очередь, обуславливает необходимость сравнительного анализа спектрально-отражательных свойств разных типов нарушений в лесах.

Изучение нарушенности выступает актуальной задачей и для лесных экосистем юга Среднерусской лесостепи, где длительное время наблюдалось сокращение площади лесопокрытых земель (Чендев и др., 2008). Леса региона представлены преимущественно нагорными дубравами, но кроме них по левобережьям наиболее крупных рек получили значительное распространение хвойные леса из насаждений сосны обыкновенной (Дегтярь и др., 2016). Сосна характеризуется неприхотливостью, способностью произрастать на бедных песчаных и супесчаных почвах (Камышев, Хмелев, 1976). Вместе с этим сосновые насаждения в сравнении с дубравами региона менее устойчивы к воздействию негативных факторов, вследствие чего для них характерны достаточно значительные площади нарушений (Терехин, 2017).

Согласно результатам исследований (Терехин, 2020), в последние десятилетия в хвойных лесах Среднерусской лесостепи отмечалось многократно большее увеличение площади нарушенных лесных участков, чем в лиственных массивах. В первые десятилетия XXI в. в сравнении с последними десятилетиями XX в. площадь нарушенных хвойных лесов выросла почти в девять раз. Хвойные леса часто подвержены воздействию таких негативных факторов, как пожары (пирогенный фактор), насекомые-вредители и болезни деревьев. Они определяют различное происхождение участков нарушенности в хвойных лесах. К достаточно распространённым насекомым-вредителям в сосновых лесах региона относится пилильщик сосновый рыжий, к болезням деревьев — корневая губка. В лесах Центрального Черноземья в период конца XX — начала XXI в. отмечался более чем трёхкратный рост насаждений, поражённых ею (Высоцкий, Корчагин, 2018). В связи с этим возникает необходимость более детальных исследований спектрально-отражательных характеристик для типов нарушенности с целью развития подходов к их выявлению, количественной оценке и геоинформационному картографированию.

Цель статьи — анализ влияния типов нарушенности в хвойных лесах Среднерусской лесостепи на их спектральную отражательную способность. В рамках исследования изучены спектрально-отражательные свойства участков, нарушенных пожарами, болезнями деревьев, насекомыми-вредителями, проведено их сравнение с участками ненарушенных лесных массивов. Задачи исследования включали анализ коэффициентов спектральной яркости для различных типов нарушений в лесах на одну и ту же дату, изучение многолетней динамики спектрально-отражательных характеристик для разных типов нарушений в лесах.

Материалы и методика исследования

Формирование выборки анализируемых объектов осуществлено на территории юга Среднерусской возвышенности, характеризующейся условиями типичной лесостепи и умеренно-континентального климата, в пределах Белгородской обл. Подбор участков хвойных лесов с различными типами нарушений осуществлён на основе совместного анализа материалов разновременной спутниковой съёмки, лесоустроительной информации, с привлечением данных полевых обследований. Выборку формировали таким образом, чтобы она репрезентативно представляла типы нарушений, характерные для сосновых лесов Среднерусской лесостепи: обусловленные воздействием пирогенного фактора, насекомых-вредителей или болезней деревьев, а также участки без нарушений древостоя.

Объекты исследования отбирались на основе ряда критериев. Для каждого участка должен быть достоверно известен тип или причина нарушенности. Участки подбирали таким образом, чтобы сравнение их спектрально-отражательных свойств можно было одновременно провести на основе данных с одного сенсора — для минимизации влияния фактора различий в особенностях съёмки и съёмочной аппаратуры.

Воздействие пирогенного фактора (пожаров) происходит в течение относительно короткого промежутка времени, а влияние болезней деревьев или насекомых-вредителей может оказывать влияние на участки леса на протяжении нескольких лет и даже десятилетий. Для обеспечения корректного совместного анализа разных типов нарушенности подбирали наиболее многочисленные участки нарушений вследствие пирогенного фактора одного года и на эти же сроки выявляли участки лесов, в которых по состоянию на этот же год проявлялось влияние насекомых-вредителей или болезней деревьев. В регионе наиболее многочисленны вследствие воздействия пирогенного фактора участки лесов, нарушенные в результате пожаров 2010 г., оценка спектрально-отражательных характеристик которых целесообразна также на следующий 2011 г. с целью получения полноценных представлений об изменении спектральной отражательной способности вследствие воздействия пожаров. На этот же год подбирали участки, нарушенные насекомыми-вредителями и болезнями деревьев.

Участки лесов, нарушенные вследствие воздействия болезней деревьев или насекомых-вредителей, подбирались на основе сопоставления лесоустроительной информации и спутниковых данных. Каждый участок (лесотаксационный выдел или его часть), нарушенный в результате влияния этих факторов, подбирался по данным лесоустройства, наиболее близким к конечной анализируемой дате. Анализ лесоустроительной информации осуществлялся одновременно с набором географически привязанных разновременных снимков Landsat TM (англ. Thematic Mapper). Для некоторых участков, расположенных в Старооскольском, Чернянском и Новооскольском районах Белгородской обл., были также использованы материалы наземных наблюдений 2011–2014 гг. и снимки сверхвысокого пространственного разрешения (1 м), полученные из интернет-архивов открытого доступа.

В анализируемую выборку, состоящую из более 200 лесных выделов (табл. 1), также включали участки лесов без нарушений древостоя и верхних ярусов, которые использовались для сравнительного анализа с участками нарушенных лесов и их спектрально-отражательными характеристиками.

Таблица 1. Описание участков с разными типами нарушений в хвойных лесах, для которых были изучены спектрально-отражательные характеристики

Тип нарушения	Число участков	Площадь средняя, га	Площадь общая, га
Пирогенный	59	5,30	312,6
Болезни деревьев	71	4,45	316,0
Насекомые-вредители	13	2,28	29,6
Участки без нарушений	58	6,02	349,0
Всего:	201	5,01	1007,3

Каждый выявленный участок нарушенности был просмотрен на спутниковых данных, которыми в исследовании выступали разновременные данные Landsat-5 TM, для проверки отсутствия облачности в случае её частичного наличия на снимках. Для анализа были выбраны снимки, полученные с этого спутника, поскольку в настоящее время они выступают единственным типом спутниковых данных, предоставляющих возможность провести анализ спектральной отражательной способности, измеренной одной аппаратурой, на протяжении интервала, охватывающего несколько десятилетий. Этот тип снимков был выбран также в связи с тем, что их пространственное разрешение, составляющее 30 м, позволяет количественно оценить отражательные характеристики относительно небольших участков лесных массивов.

Оценка отражательной способности включала анализ коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) лесных участков на конечную анализируемую дату (2011) и анализ многолетних рядов спектрально-отражательных характеристик в предшествующий период времени. Последний проведён с целью более глубокого изучения влияния нарушений в лесах на их от-

ражательную способность и охватывал период 1984–2011 гг., т.е. максимально возможный временной интервал, на который были доступны материалы съёмки с сенсора. Для анализа сформирован набор разновременных снимков Landsat TM (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>), включающий изображения, отобранные на один и тот же сезон года — август (табл. 2), т.е. наименее облачный месяц в году для региона исследования, что сделано для минимизации влияния фактора фенологических различий. Снимки Landsat отбирались на близкие ячейки, которые в системе WRS-2 (*англ.* World Reference System-2), используемой для определения местоположения снимков Landsat TM на земной поверхности, имели параметры Path (колонка) 177, Row (ряд) 24 и Path 176, Row 24.

Таблица 2. Характеристики снимков Landsat TM, использованных для анализа многолетней динамики спектрально-отражательных свойств разных типов нарушений в хвойных лесах Среднерусской лесостепи

WRS-2	Дата	WRS-2	Дата
177024	10.08.1984	177024	25.08.2001
	29.08.1985		20.08.2002
	21.08.1988		31.08.2003
	24.08.1989		18.09.2004
	16.08.1992	176024	16.08.2006
	25.08.1995	177024	10.08.2007
	11.08.1996		12.08.2008
	01.08.1998		01.07.2010
	22.08.2000	176024	31.08.2011

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 (Blue), зелёный (Green), красный (Red), ближний инфракрасный (NIR — *англ.* near infrared) и два коротковолновых инфракрасных (SWIR1, SWIR2 — *англ.* short wave infrared) диапазона. Коэффициенты спектральной яркости в каждой зоне спектра для отдельных лесных участков вычислены методом зональной статистики.

Количественное сравнение спектрально-отражательных характеристик различных типов нарушенности в лесах по состоянию на конечную анализируемую дату (2011) осуществлено отдельно в каждой зоне спектра. На этом же этапе для каждого типа нарушенности проведено сравнение с участками лесов без нарушений древостоя. Оно осуществлено с целью выявления диапазонов, наиболее информативных для развития методов автоматизированного распознавания типов нарушений в хвойных лесах. Для каждого из них исследованы особенности многолетней динамики коэффициентов спектральной яркости, охватывающие период, предшествующий конечной анализируемой дате. Он охватывал значения спектрально-отражательных характеристик на 18 временных срезов с 1984 по 2011 г. Анализ многолетних рядов включал определение наличия или отсутствия статистически значимого тренда в многолетней динамике.

Результаты и их обсуждение

Основное отличие нарушенных лесов от ненарушенных лесных массивов состоит в более высоких значениях спектрально-отражательных характеристик во всех диапазонах, за исключением ближнего инфракрасного канала (*рис. 1*, см. с. 168), в котором проявляется обратная закономерность.

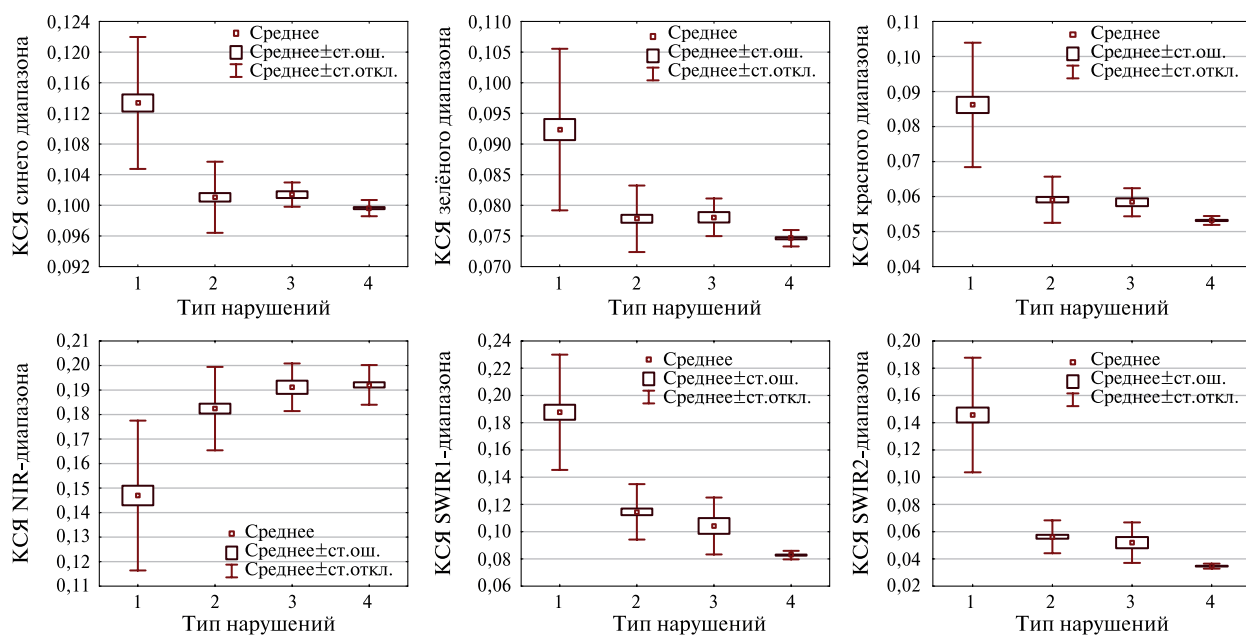


Рис. 1. Параметры спектрально-отражательных характеристик для разных типов нарушений в хвойных лесах Среднерусской лесостепи. Тип нарушения: 1 — пирогенный, 2 — болезни деревьев, 3 — влияние насекомых-вредителей, 4 — без нарушений древостоя

Виды нарушений лесных экосистем (пирогенные, повреждения болезнями, насекомыми-вредителями), типичные для хвойных лесов региона, характеризуются определёнными различиями по отражательной способности. В ряду «пирогенные повреждения – повреждения болезнями – повреждения вредителями – ненарушенные участки» наблюдается закономерность снижения отражательной способности в красном и коротковолновом инфракрасном диапазонах. Соответствующие различия обусловлены величиной воздействия нарушающего фактора на древостой. Чем сильнее воздействие, тем более существенно происходит повышение отражательной способности. В NIR-диапазоне наблюдается обратная закономерность.

Нарушения в лесах не только приводят к изменению абсолютных значений коэффициентов спектральной яркости, но и обуславливают повышение вариации спектрально-отражательных характеристик. Она проявляется в увеличении значений стандартного отклонения (см. рис. 1) и, соответственно, в коэффициентах вариации (табл. 3).

Таблица 3. Параметры спектрально-отражательных характеристик для различных типов нарушений в хвойных лесах на основе данных Landsat TM

Спектральные диапазоны Landsat TM	Тип нарушения							
	Ненарушенные леса		Пирогенные нарушения		Болезни деревьев		Насекомые-вредители	
	Среднее	V	Среднее	V	Среднее	V	Среднее	V
Blue	0,100	1,1	0,113	7,6	0,101	4,6	0,101	1,6
Green	0,075	1,8	0,092	14,3	0,078	7,0	0,078	3,9
Red	0,053	2,4	0,086	20,6	0,059	11,2	0,058	6,9
NIR	0,192	4,2	0,147	20,8	0,182	9,3	0,191	5,1
SWIR1	0,083	3,8	0,188	22,6	0,115	17,8	0,104	20,1
SWIR2	0,002	5,4	0,042	28,9	0,012	21,5	0,015	28,6

Примечание: V — коэффициент вариации, %.

Если участки лесов без нарушений древостоя характеризуются величинами коэффициента вариации от 1 до 5 % в зависимости от спектрального диапазона, то для участков нарушенных насаждений характерен 3–5-кратный рост в сравнении со значениями, соответствующими ненарушенным лесам. Некоторое исключение составляет синий канал, что может быть обусловлено высоким рассеянием излучения в нём по сравнению с остальными диапазонами и вследствие этого более низкими качеством самого изображения. В большинстве же каналов повышение абсолютных величин спектрально-отражательных характеристик с одновременным ростом вариации выступает достаточно устойчивым признаком нарушенности лесов.

Наиболее существенное влияние на лесной полог оказывают пожары, которые часто приводят к полной гибели лесных насаждений и наиболее значительному изменению спектрально-отражательных характеристик территории. На таких участках впоследствии проводится сведение сгоревших древостоев с последующим лесовосстановлением. Менее существенное влияние на леса оказывают болезни деревьев, приводящие к частичной их гибели и изреживанию насаждений. Влияние насекомых-вредителей в регионе заключается, как правило, в повреждении отдельных деревьев.

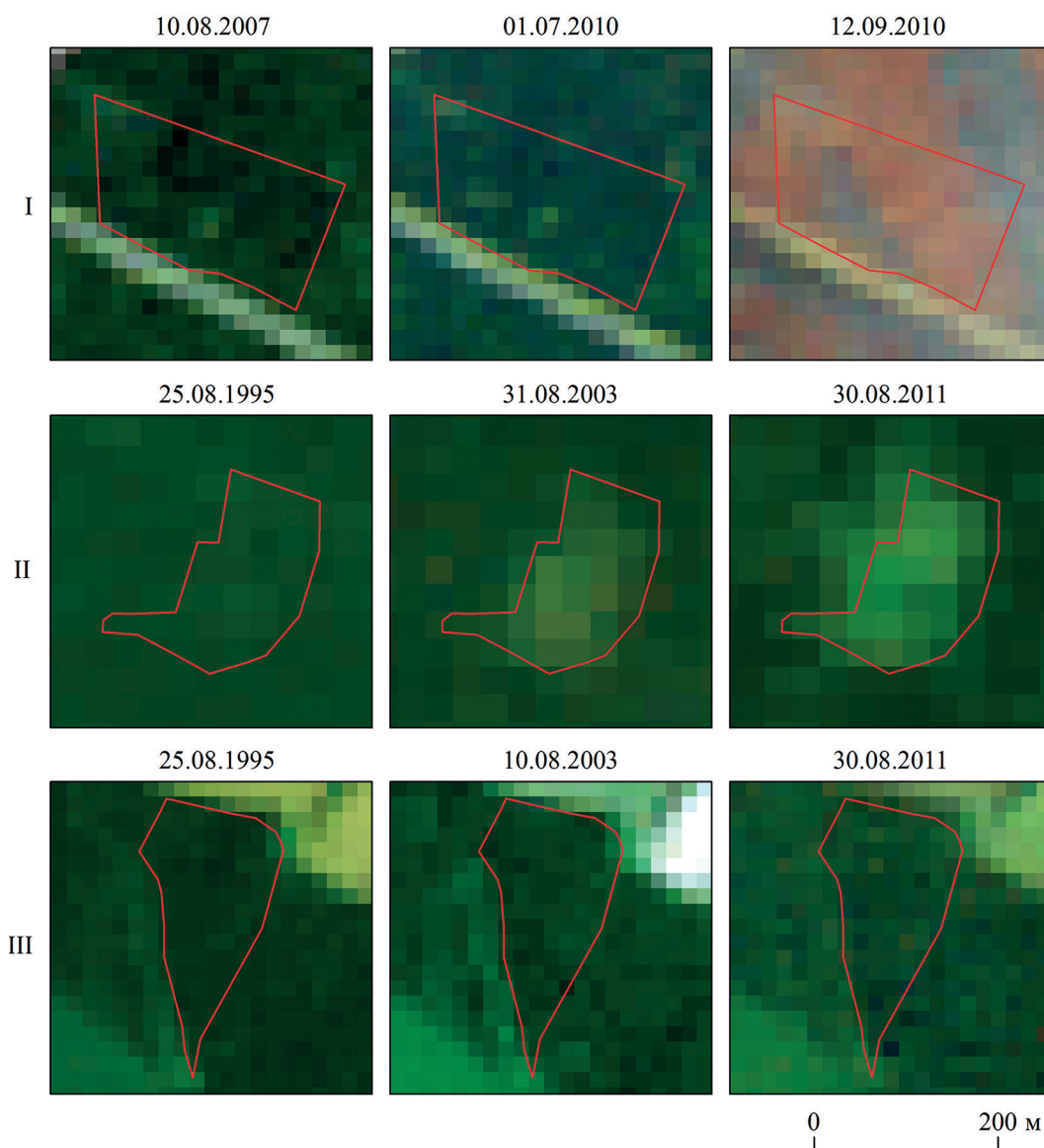


Рис. 2. Отображение на снимках Landsat TM участков сосновых лесов, нарушенных в результате воздействия пожаров (I), болезней деревьев (II) и насекомых-вредителей (III). Синтез каналов: SWIR 2 – SWIR 1 – Red

Несмотря на общую выявленную закономерность в изменении отражательной способности разных типов нарушений, статистически значимые различия характерны не для всех из них. Таковыми отличиями от остальных типов нарушений во всех диапазонах Landsat TM характеризуются участки пирогенного воздействия. Для остальных типов нарушений статистически значимые различия по отражательной способности присутствуют либо в отдельных каналах, либо отсутствуют полностью. Наибольшее число попарных статистически значимых различий зафиксировано в диапазонах SWIR-излучения (каналы 5, 7 Landsat). Но даже в них не выявлено статистически значимых различий между участками, повреждёнными болезнями деревьев или насекомыми-вредителями. Различия в величине воздействия нарушающих факторов на хвойные леса достаточно отчётливо проявляются на разновременных снимках (рис. 2, см. с. 169).

Если воздействие пожаров приводит к изменениям в отображении лесов на снимках в год нарушения, то влияние фактора болезней также заметно при сопоставлении разновременных снимков, полученных с достаточно значительным временным интервалом. Воздействие фактора насекомых-вредителей при визуальном анализе снимков проявляется очень слабо.

Каждый изученный тип нарушений в лесах характеризуется своими особенностями многолетней динамики коэффициентов спектральной яркости в SWIR-диапазоне. Она оценена на основе снимков одного и того же месяца (август), но разных лет и прошедших этап атмосферной и радиометрической коррекции. Для участков пирогенных нарушений характерно резкое повышение коэффициентов спектральной яркости в SWIR-диапазоне (1,55–1,75 мкм), происходящее после повреждения древостоя пожаром (рис. 3).

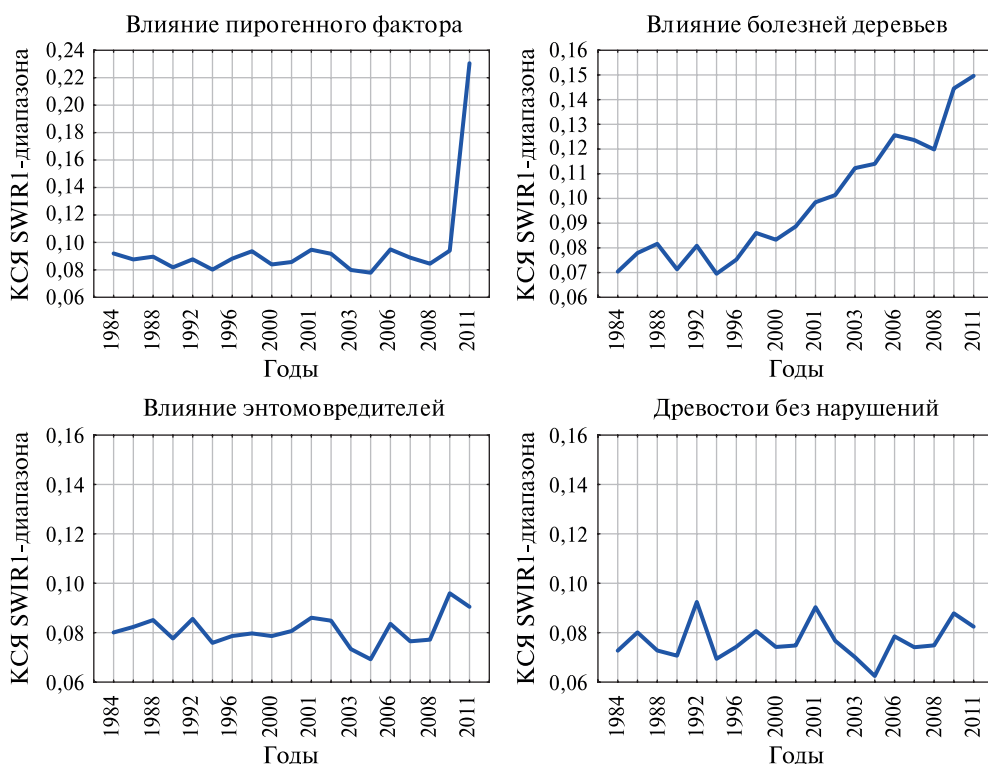


Рис. 3. Примеры многолетней динамики коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона (август) для различных типов нарушений в хвойных лесах

Для участков, нарушенных в результате болезней деревьев, например корневой губки, на которых вследствие этого происходит усыхание древостоя, характерна тенденция к постепенному увеличению значений отражательной способности. Воздействие энтомовредителей относительно слабо проявляется в спектрально-отражательных характеристиках, но также приводит к повышению коэффициентов спектральной яркости, хотя и менее значительному

в сравнении с остальными типами нарушений. Многолетняя динамика участков, нарушенных насекомыми-вредителями, практически не отличается от аналогичной динамики отражательных характеристик лесов без нарушений древостоя и верхних ярусов. В SWIR2-диапазоне (2,09–2,35 мкм) особенности многолетней динамики спектрально-отражательных характеристик практически аналогичны соответствующей динамике в SWIR1-диапазоне (1,55–1,75 мкм). В синем (0,45–0,52 мкм), зелёном (0,52–0,60 мкм) и красном (0,63–0,69 мкм) диапазонах различия в многолетней динамике спектрально-отражательных характеристик для разных типов нарушений в хвойных лесах выражены в меньшей степени.

Количественный анализ рядов многолетних изменений КСЯ, проведённый для изученных типов нарушенности с применением непараметрического критерия tau Манна – Кендалла (в программе R), показал, что статистически значимые тренды характерны только для участков нарушенности, обусловленной воздействием болезней деревьев. Наблюдаются они при этом только в SWIR-диапазонах (табл. 4). Критерий tau Манна – Кендалла выступает индикатором непрерывной статистически значимой тенденции.

Таблица 4. Параметры tau Манна – Кендалла для многолетней динамики спектрально-отражательных характеристик в 1984–2011 гг. по данным Landsat TM для различных типов нарушенности в хвойных лесах Среднерусской лесостепи

Фактор нарушенности	Спектральные диапазоны Landsat TM					
	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
Пирогенный	0,0292	0,0292	0,076	0,0175	0,146	–0,170
Болезни деревьев	0,0526	0,1700	0,246	0,275	0,825*	0,813*
Насекомые-вредители	–0,0877	–0,076	–0,111	0,0058	0,0409	–0,228
Без нарушений	–0,0643	–0,0292	–0,076	0,579	0,158	–0,123

* Статистически значимые значения на уровне 0,05.

Из полученных результатов следует, что для хвойных лесов региона индикатором нарушенности вследствие болезней деревьев выступает наличие статистически значимого многолетнего тренда в спектрально-отражательных характеристиках в обоих SWIR-диапазонах Landsat TM, а соответственно, и сенсоров Landsat более поздних поколений. Влияние энтомо-вредителей приводит к ухудшению состоянию деревьев, но вместе с этим не характеризуется статистически значимой тенденцией в изменении их коэффициентов спектральной яркости.

Таким образом, различные типы нарушенности в хвойных лесах Среднерусской лесостепи по-разному оказывают влияние на их спектрально-отражательные характеристики. Индикатором нарушенности вследствие воздействия болезней деревьев (преимущественно корневой губки) выступает наличие статистически значимого тренда в повышении спектральной отражательной способности в SWIR-диапазонах, проявляющегося на протяжении достаточно значительного интервала времени — порядка 10–15 лет. Индикатором нарушенности в результате воздействия пирогенного фактора выступает значительное в сравнении со среднегодовыми значениями повышение отражательной способности в SWIR-диапазонах. Участки, нарушенные в результате влияния насекомых-вредителей, не характеризуются такими выраженными признаками, как участки, нарушенные пожарами или болезнями деревьев.

Отсутствие статистически значимых различий по спектрально-отражательным характеристикам (измеренным в один и тот же год) между некоторыми типами нарушений в лесах, в первую очередь между участками, нарушенными болезнями деревьев и насекомыми-вредителями, будет осложнять разработку подходов к их автоматизированному распознаванию. Вариантом решения этой проблемы с учётом наличия статистически значимых трендов отражательных характеристик для хвойных лесов, нарушенных болезнями деревьев, может стать применение серий многолетних снимков. Участки, нарушенные пожарами, вследствие нали-

чия статистически значимых отличий от остальных типов нарушений, а также отличий, проявляющихся в многолетней динамике их спектрально-отражательных характеристик, должны выделяться наиболее достоверно среди ненарушенных лесов и остальных типов нарушенных насаждений.

Выводы

Основные типы нарушений в хвойных лесах Среднерусской лесостепи характеризуются более высокими значениями коэффициентов спектральной яркости по сравнению с участками лесов без нарушений древостоя в диапазонах красного и коротковолнового инфракрасного излучения. В ближнем инфракрасном диапазоне наблюдается обратная закономерность. В ряду «пирогенные повреждения – повреждения болезнями – повреждения насекомыми-вредителями – ненарушенные участки леса» в каналах красного и SWIR-излучения наблюдается тенденция снижения абсолютных значений спектрально-отражательных характеристик. Повышение нарушенности древостоя сосновых лесов обуславливает увеличение вариации спектрально-отражательных свойств. Участки, нарушенные в результате воздействия пожаров (постпирогенные), статистически значимо отличаются от всех остальных типов нарушений. Для участков сосновых лесов, нарушенных болезнями деревьев, установлено наличие статистически значимого многолетнего тренда в отражательных характеристиках SWIR-диапазонов. Для участков, нарушенных насекомыми-вредителями, не выявлено статистически значимых многолетних изменений в спектрально-отражательных характеристиках.

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. *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.
3. *Высоцкий А.А., Корчагин О.М.* Корневая губка в насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris* L.). Проблемы и пути решения // *Изв. Санкт-Петербургской лесотехн. акад.* 2018. № 224. С. 176–192. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.224.176-192.
4. *Дегтярь А.В., Григорьева О.И., Татаринцев Р.Ю.* Экология Белогорья в цифрах. Белгород: Константа, 2016. 122 с.
5. *Камышев Н.С., Хмелев К.С.* Растительный покров Воронежской области и его охрана. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1976. 181 с.
6. *Луян Е.А., Лозин Д.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В.* Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
7. *Стыценко Ф.В., Барталев С.А., Букась А.В., Ершов Д.В., Сайгин И.А.* Возможности пролонгированной оценки постпожарного состояния хвойных вечнозелёных лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 5. С. 217–227. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227.
8. *Терехин Э.А.* Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 4. С. 112–124. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-112-124.
9. *Терехин Э.А.* Изменение нарушенности лесных экосистем лесостепной зоны Центрального Черноземья в конце XX – начале XXI века // *Исслед. Земли из космоса*. 2020. № 3. С. 26–37. DOI: 10.31857/S0205961420030069.
10. *Чендев Ю.Г., Петин А.Н., Серикова Е.В., Крамчанинов А.Н.* Деградация геосистем Белгородской области в результате хозяйственной деятельности // *География и природные ресурсы*. 2008. № 4. С. 69–75.

11. Швецов Е. Г. Исследование влияния мощности теплоизлучения лесных пожаров на степень повреждения лесов на территории юга Средней Сибири по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 136–146. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-136-146.
12. Barta K. A., Hais M., Heurich M. Characterizing forest disturbance and recovery with thermal trajectories derived from Landsat time series data // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 282. Art. No. 113274. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113274.
13. Borrelli P., Modugno S., Panagos P., Marchetti M., Schütt B., Montanarella L. Detection of harvested forest areas in Italy using Landsat imagery // Applied Geography. 2014. V. 48. P. 102–111. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.01.005.
14. Gale M. G., Cary G. J., Van Dijk A. I. J. M., Yebra M. Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 255. Art. No. 112282. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112282.
15. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. No. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
16. Long L., Chen Y., Song S., Zhang X., Jia X., Lu Y., Liu G. Remote Sensing Monitoring of Pine Wilt Disease Based on Time-Series Remote Sensing Index // Remote Sensing. 2023. V. 15(2). DOI: 10.3390/rs15020360.
17. Lu J., Huang C., Tao X., Gong W., Schleeweis K. Annual forest disturbance intensity mapped using Landsat time series and field inventory data for the conterminous United States (1986–2015) // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 275. Art. No. 113003. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113003.
18. 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. V. 159. P. 28–43. DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.027.
19. Schroeder T. A., Wulder M. A., Healey S. P., Moisen G. G. Mapping wildfire and clearcut harvest disturbances in boreal forests with Landsat time series data // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. No. 6. P. 1421–1433. DOI: 10.1016/j.rse.2011.01.022.
20. Stahl A. T., Andrus R., Hicke J. A., Hudak A. T., Bright B. C., Meddens A. J. H. Automated attribution of forest disturbance types from remote sensing data: A synthesis // Remote Sensing of Environment. 2023. V. 285. P. 113416. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113416.
21. Tran T. V., de Beurs K. M., Julian J. P. Monitoring forest disturbances in Southeast Oklahoma using Landsat and MODIS images // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. V. 44. P. 42–52. DOI: 10.1016/j.jag.2015.07.001.
22. White J. C., Wulder M. A., Hermosilla T., Coops N. C., Hobart G. W. A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 194. P. 303–321. DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.035.
23. Woodward B., Engelstad P., Vorster A., Beddow C., Krail S., Vashisht A., Evangelista P. Forest harvest dataset for northern Colorado Rocky Mountains (1984–2015) generated from a Landsat time series and existing forest harvest records // Data in Brief. 2017. V. 15. P. 724–727. DOI: 10.1016/j.dib.2017.10.030.
24. Zhao F., Huang C., Goward S. N., Schleeweis K., Rishmawi K., Lindsey M. A., Denning E., Keddell L., Cohen W. B., Yang Z., Dungan J. L., Michaelis A. 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.

Influence of forest disturbance types on spectral reflectance of coniferous stands in forest-steppe natural zone

E. A. Terekhin

Belgorod State National Research University, Belgorod 308015, Russia

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Forest disturbance is one of key factors affecting the state of forests ecosystems, age structure and stand parameters. The article explores spectral reflectance of disturbance types in coniferous forests: burnt areas, areas disturbed by tree diseases and insect pests. Forest disturbance leads to an increase in reflectance in most Landsat bands, with the exception of the NIR band. An increase in forest disturbance also results in an increase in reflectance variation. A decreasing reflectance along the row “forest fire damage – damage by diseases – damage by pests – undisturbed forest areas” in the red and SWIR ranges was revealed. The reverse pattern was revealed in the near infrared range. Burnt forest areas are characterized by statistically significant differences in spectral reflectance in the visible and infrared ranges from all other disturbance types. Areas damaged by tree diseases are characterized by a statistically significant positive long-term reflectance trend in SWIR ranges and none in the other bands. For areas damaged by insect pests, no long-term trends in spectral reflectance have been identified.

Keywords: forest disturbance, spectral reflectance, remote sensing, Central Russian forest-steppe, Landsat

Accepted: 25.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-164-175

References

1. Bartalev S.A., Kuryatnikova T.S., Stibig Kh.Yu., Methods for the analysis of time-series of high-resolution satellite images for the assessment of logging in the taiga, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, No. 2, pp. 217–227 (in Russian).
2. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Polevshchikova Yu.A., Lezhnin S.A., Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images, *Sovremennye 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.
3. Vysotskii A.A., Korchagin O.M., Annosum root rot in scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) forest plantations. Problems and ways to deal with them, *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2018, No. 224, pp. 176–192 (in Russian), DOI: 10.21266/2079-4304.2018.224.176-192.
4. Degtyar' A.V., Grigor'eva O.I., Tatarintsev R.Yu., *Ekologiya Belgor'ya v tsifrah* (Ecology of Belgoroye in numbers), Belgorod: Konstanta, 2016, 122 p. (in Russian).
5. Kamyshev N.S., Khmelev K.S., *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).
6. Loupian E.A., Lozin D.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
7. Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Bukas A.V., Ershov D.V., Saigin I.A., The possibilities of prolonged burnt severity assessment of evergreen coniferous forest using multi-spectral satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 217–227 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227.
8. Terekhin E.A., Estimation of forest ecosystems disturbance in the southwest of Central Russian Upland using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 112–124 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-112-124.
9. Terekhin E.A., Change of Forest Ecosystems Disturbance in the Forest-Steppe Zone of the Central Chernozem Region at the End of the XX Century – beginning of the XXI Century, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 3, pp. 26–37 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961420030069.

10. Chendev Yu. G., Petin A. N., Serikova E. V., Kramchaninov N. N., Degradation of geosystems in the Belgorod region as a result of the economic activities, *Geography and Natural Resources*, 2008, Vol. 29, No. 4, pp. 348–353, DOI: 10.1016/j.gnr.2008.10.010.
11. Shvetsov E. G., Study of the influence of fire radiative power of forest fires on forest disturbance degree in southern regions of Central Siberia using satellite data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 136–146 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-136-146.
12. Barta K. A., Hais M., Heurich M., Characterizing forest disturbance and recovery with thermal trajectories derived from Landsat time series data, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 282, Art. No. 113274, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113274.
13. Borrelli P., Modugno S., Panagos P., Marchetti M., Schütt B., Montanarella L., Detection of harvested forest areas in Italy using Landsat imagery, *Applied Geography*, 2014, Vol. 48, pp. 102–111, DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.01.005.
14. Gale M. G., Cary G. J., Van Dijk A. I. J. M., Yebra M., Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 255, Art. No. 112282, DOI: 10.1016/j.rse.2020.112282.
15. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, No. 6160, pp. 850–853, DOI: 10.1126/science.1244693.
16. Long L., Chen Y., Song S., Zhang X., Jia X., Lu Y., Liu G., Remote Sensing Monitoring of Pine Wilt Disease Based on Time-Series Remote Sensing Index, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15(2), DOI: 10.3390/rs15020360.
17. Lu J., Huang C., Tao X., Gong W., Schleeweis K., Annual forest disturbance intensity mapped using Landsat time series and field inventory data for the conterminous United States (1986–2015), *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 275, Art. No. 113003, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113003.
18. 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, DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.027.
19. Schroeder T. A., Wulder M. A., Healey S. P., Moisen G. G., Mapping wildfire and clearcut harvest disturbances in boreal forests with Landsat time series data, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, No. 6, pp. 1421–1433, DOI: 10.1016/j.rse.2011.01.022.
20. Stahl A. T., Andrus R., Hicke J. A., Hudak A. T., Bright B. C., Meddens A. J. H., Automated attribution of forest disturbance types from remote sensing data: A synthesis, *Remote Sensing of Environment*, 2023, Vol. 285, Art. No. 113416, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113416.
21. Tran T. V., de Beurs K. M., Julian J. P., Monitoring forest disturbances in Southeast Oklahoma using Landsat and MODIS images, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, Vol. 44, pp. 42–52, DOI: 10.1016/j.jag.2015.07.001.
22. White J. C., Wulder M. A., Herмосilla T., Coops N. C., Hobart G. W., A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 194, pp. 303–321, DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.035.
23. Woodward B., Engelstad P., Vorster A., Beddow C., Krail S., Vashisht A., Evangelista P., Forest harvest dataset for northern Colorado Rocky Mountains (1984–2015) generated from a Landsat time series and existing forest harvest records, *Data in Brief*, 2017, Vol. 15, pp. 724–727, DOI: 10.1016/j.dib.2017.10.030.
24. Zhao F., Huang C., Goward S. N., Schleeweis K., Rishmawi K., Lindsey M. A., Denning E., Keddell L., Cohen W. B., Yang Z., Dungan J. L., Michaelis A., 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.