

Выявление зависимостей между параметрами лесов Среднерусской лесостепи и спектральными отражательными свойствами на основе данных Sentinel-2

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*

Изложены результаты анализа зависимостей между биометрическими параметрами (возрастом, высотой, запасом стволовой древесины) широколиственных лесов, типичных для Среднерусской лесостепи, и спектральной отражательной способностью, измеренной по данным Sentinel-2. Возраст лесных массивов с преобладанием дуба находится в обратной зависимости со спектральной отражательной способностью в каналах сенсора. Наиболее сильная связь между возрастом и отражательными характеристиками выявлена в диапазонах красного и SWIR-излучения (*англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный). Зависимости между возрастом леса и отражательной способностью в изученных каналах Sentinel-2 криволинейны и наиболее достоверно аппроксимируются логарифмической кривой. Высота и запас насаждений с преобладанием в древостое дуба также находятся в обратной криволинейной зависимости со спектрально-отражательными свойствами во всех диапазонах. Для высоты лесных массивов с преобладанием дуба в большинстве диапазонов характерна несколько более сильная связь с коэффициентами спектральной яркости, чем с возрастом насаждений. Для лесных участков с преобладанием ясеня характерны близкие зависимости между возрастом, высотой леса и спектральными характеристиками, так же как и для лесных массивов с преобладанием дуба. Для возраста и высоты лесных массивов с преобладанием ясеня наиболее сильная связь со значениями спектральной отражательной способности также установлена в SWIR-каналах Sentinel-2.

Ключевые слова: возраст леса, высота леса, Среднерусская лесостепь, данные дистанционного зондирования, Sentinel-2

Одобрена к печати: 28.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-124-137

Введение

Исследование зависимостей между параметрами лесов и их спектрально-отражательными характеристиками выступает теоретической основой для изучения лесных экосистем на основе данных дистанционного зондирования. Выявление закономерностей изменения отражательной способности в зависимости от возраста и высоты лесных насаждений представляется фундаментальной задачей, решение которой позволяет анализировать изменения в наземной биомассе и продуктивности (Сочилова, Ершов, 2012; Hall et al., 2006; Lu, 2006; Zheng et al., 2004). Исследование спектрально-отражательных свойств лесов необходимо для моделирования лесовозобновления на нарушенных лесных землях (Жиринов и др., 2013; Morresi et al., 2019), картографирования нарушенности лесных экосистем (Терехин, 2020) и пространственного анализа их характеристик (Гаврилюк и др., 2021; Жарко и др., 2018; Matasci et al., 2018).

Для выявления закономерностей динамики спектрально-отражательных характеристик лесов в зависимости от их параметров могут быть использованы данные оптического диапазона (Kuusinen et al., 2014; Li et al., 2011; Lu et al., 2004) либо материалы лазерного сканирования (Ahmed et al., 2015; Potapov et al., 2021; Socha et al., 2017). Лидарные снимки в силу специфики их получения применяются более ограниченно.

Исследования, проведённые к настоящему времени, показывают, что на зависимости между биометрическими параметрами лесов и их спектрально-отражательными свойствами могут оказывать влияние породный состав (Жирин и др., 2014; Graf et al., 2019) и региональные особенности анализируемых лесных насаждений. Вместе с этим на особенности исследуемых зависимостей могут влиять и характеристики применяемых спутниковых данных (Astola et al., 2019; Kimes et al., 1996;). Обусловлено это тем, что спектральные диапазоны и их число, а также радиометрическое и пространственное разрешение сенсоров могут существенно различаться. В этой связи получение объективных представлений о влиянии характеристик лесных насаждений на отражательные свойства требует учёта перечисленных факторов. Исследование зависимостей между биометрическими параметрами и спектрально-отражательными свойствами лесных экосистем также обуславливает необходимость анализа значительного объёма фактической информации.

Повышение качества спутниковых материалов, связанное с увеличением радиометрического разрешения при детальности, достаточной для анализа отражательных свойств отдельных лесотаксационных выделов, представляет значительный интерес для расширения знаний о влиянии биометрических параметров леса на его спектральную отражательную способность. Примером таких данных выступают многозональные снимки со спутников Sentinel-2 (Cardille et al., 2022; Zhang et al., 2021), накопление архивов с которых ведётся с 2015 г. Изображения, полученные с Sentinel-2, имеют достаточно высокое пространственное разрешение, составляющее от 10 до 20 м в видимой и инфракрасной областях. Соответствующий размер пикселя позволяет анализировать отражательную способность даже небольших (менее 1 га) участков лесных экосистем, характеризующихся однородностью породного состава, лесорастительных условий и биометрических параметров. Вместе с этим для данных Sentinel-2 MSI (англ. MultiSpectral Instrument) характерно и высокое радиометрическое разрешение, что делает возможным более глубокое изучение спектрально-отражательных характеристик лесов в сравнении с сенсорами предыдущих поколений.

На территории юга Среднерусской возвышенности лесные массивы представлены преимущественно нагорными дубравами (Бугаев и др., 2013). В их в верхних ярусах в большинстве случаев преобладает дуб нагорный высокоствольный или дуб нагорный низкоствольный при наличии определённой доли ясеня. В меньшей степени представлены леса, в древостое которых наибольшую долю занимает ясень обыкновенный. При относительно невысокой лесистости (Дегтярь, Григорьева, 2018) в лесах региона сосредоточена значительная доля дубрав России. Наиболее крупные массивы широколиственных лесов располагаются на водоразделах и возвышенных правобережьях наиболее крупных рек. Относительно небольшие по площади, достаточно многочисленные лесные массивы распространены в верховьях овражно-балочных систем и на водоразделах. Из типов лесорастительных условий наиболее широко представлены свежие дубравы — Д₂ (Реуцкая, Арефьев, 2009).

Цель исследования заключалась в анализе зависимостей между ключевыми параметрами лесов (возрастом, высотой, запасом стволовой древесины) юга Среднерусской лесостепи и их спектрально-отражательными характеристиками, измеренными по спутниковым данным Sentinel-2.

Материалы и методика исследования

Анализируемая территория (рис. 1, см. с. 126) располагалась в лесостепной природной зоне в подзоне типичной лесостепи. Объекты для исследования подбирали таким образом, чтобы они репрезентативно отражали региональные особенности лесов региона.

Территория исследования охватывалась тайлом (фрагментом) снимка Sentinel-2 с номером T37UCS и частично тайлом T37UDS, которые были использованы для изучения спектрально-отражательных характеристик лесных массивов. Для анализа было отобрано 302 лесных участка, в которых преобладающей породой в верхнем ярусе был дуб, и 106 участков, в которых основной породой был ясень (табл. 1). Лесные участки (лесотаксационные выделы) отбирали на основе данных последнего лесоустройства.

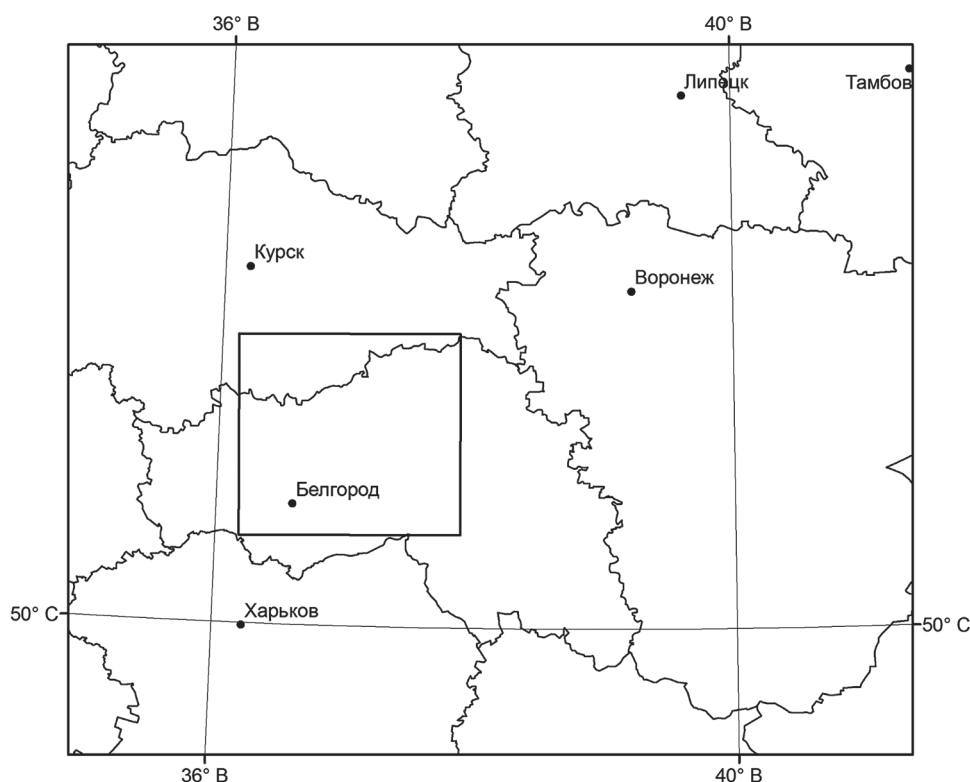


Рис. 1. Местоположение исследуемой территории и тайлов снимков Sentinel-2, используемых для анализа спектрально-отражательных характеристик лесных массивов

Таблица 1. Характеристики лесных участков, изученных для анализа влияния параметров лесных массивов на спектральную отражательную способность по данным Sentinel-2

Лесообразующая порода	Число лесных участков	Площадь, га	
		общая	средняя
Дуб	302	3584,1	11,9
Ясень	106	765,3	7,2
Всего:	408	4349,4	10,7

Выделы стремились отбирать таким образом, чтобы они располагались в аналогичных лесорастительных условиях — преимущественно в дубраве свежей (D_2) и характеризовались примерно аналогичным бонитетом. Основу аналитической выборки составили наиболее распространенные в широколиственных лесах региона насаждения II класса бонитета.

Для всех отобранных лесных массивов с использованием геоинформационных средств была подготовлена векторная основа, в атрибутивную составляющую которой внесена подробная информация о породном составе, возрасте, высоте, диаметре стволов, запасе стволовой древесины и других лесотаксационных характеристиках.

Оценка спектрально-отражательных свойств лесных массивов осуществлена на основе спутниковых данных Sentinel-2 (источник данных: earthexplorer.usgs.gov/), включающих два тайла с номерами T37UCS и T37UDS, полученных 26.08.2015. Для анализа были подобраны безоблачные снимки, сделанные в сроки, наиболее близкие к срокам проведения лесоустройства. Каждый изученный лесотаксационный выдел был просмотрен на снимках и проверен на предмет наличия возможных нарушений лесного покрова. Оба тайла Sentinel-2 прошли радиометрическую и атмосферную коррекцию в программе SNAP (*англ.* Sentinel Application Platform). В результате они были пересчитаны из уровня L1C в уровень L2A, содержащий значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) на нижней границе атмосферы (*англ.*

Bottom of Atmosphere — BOA). Для корректности сопоставления спектральной отражательной способности в разных диапазонах спектра все каналы Sentinel-2 были приведены к одному пространственному разрешению — 20 м.

Спектрально-отражательные характеристики для лесных выделов рассчитаны методом зональной статистики и изучены в девяти каналах Sentinel-2: синем (*англ.* Blue, канал 2), зелёном (*англ.* Green, канал 3), красном (*англ.* Red, канал 4), трёх крайних красных (*англ.* Red edge, каналы 5–7), ближнем инфракрасном (*англ.* near infrared — NIR, канал 8A) и двух SWIR-диапазонах (*англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный, каналы 11–12). Оценка влияния возраста и высоты насаждений на их отражательные свойства для выделов с преобладанием дуба и ясеня осуществлена отдельно. Кроме того, было выполнено сопоставление спектральной отражательной способности для разных классов возраста лесных насаждений.

Результаты и их обсуждение

Для лесных насаждений, основу верхних ярусов которых составляет дуб, наиболее тесная связь между возрастом леса и спектрально-отражательными свойствами выявлена в красном (канал 4) и SWIR (11 и 12) каналах сенсора. Коэффициенты спектральной яркости всех диапазонов Sentinel-2 характеризуются обратной связью с возрастом лесных массивов (*табл.* 2). В каждом из изученных диапазонов она статистически значима на уровне 0,05. Более высокие значения непараметрического рангового коэффициента корреляции Спирмена, чем коэффициента корреляции Пирсона, выступают индикаторами нелинейности связи между возрастом и спектрально-отражательными характеристиками.

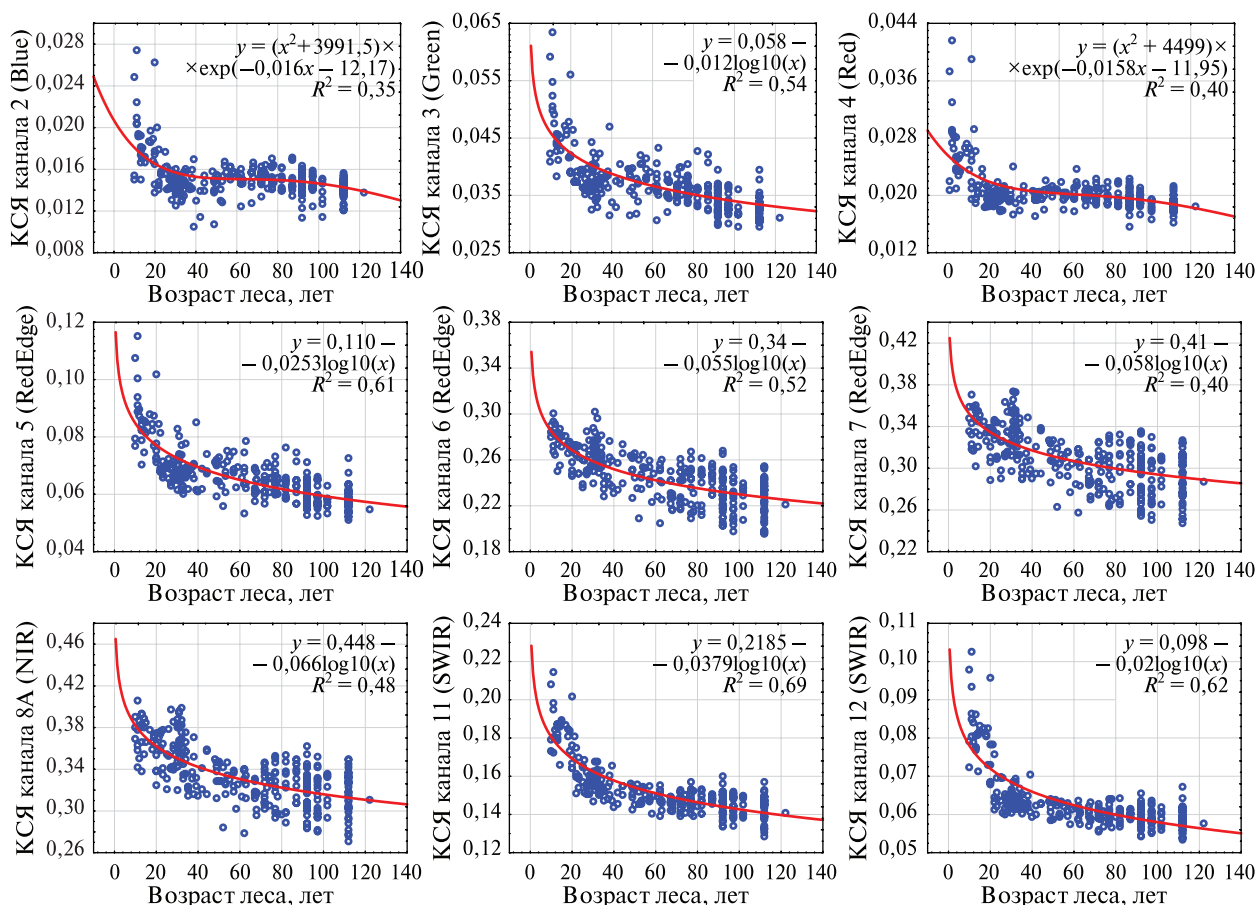


Рис. 2. Зависимости между возрастом лесных насаждений с преобладанием дуба и коэффициентами спектральной яркости в каналах Sentinel-2

Таблица 2. Характеристики тесноты связи между возрастом лесных насаждений с преобладанием дуба и коэффициентами спектральной яркости по данным Sentinel-2

Коэффициент корреляции	Спектральные диапазоны Sentinel-2								
	Blue	Green	Red	Red edge1	Red edge2	Red edge3	NIR	SWIR1	SWIR2
Пирсона	−0,42	−0,67	−0,49	−0,72	−0,71	−0,62	−0,67	−0,73	−0,66
Спирмена	−0,40	−0,73	−0,52	−0,77	−0,71	−0,61	−0,65	−0,76	−0,73

Наиболее значительное превышение коэффициента корреляции Спирмена над коэффициентом корреляции Пирсона проявляется в диапазоне зелёных волн, первом крайнем красном и в SWIR-диапазоне.

Зависимость между возрастом лесных массивов с преобладанием дуба и спектрально-отражательными характеристиками в каналах крайней красной, ближней и средней инфракрасной областей наиболее достоверно аппроксимируется логарифмической кривой (рис. 2, см. с. 127). В синем и красном диапазонах аналогичная зависимость может быть аппроксимирована логит-функцией либо функцией вида: $y = x^2 \cdot e^{-x}$.

Наиболее достоверная аппроксимация связи с возрастом характерна для коэффициентов спектральной яркости в 11-м (SWIR) диапазоне Sentinel-2. Вместе с этим необходимо отметить общую закономерность снижения отражательной способности во всех каналах по криволинейной зависимости.

Для высоты лесных насаждений с преобладанием дуба наиболее сильная связь со спектрально-отражательными характеристиками установлена в SWIR-диапазонах (табл. 3). Все коэффициенты корреляции статистически значимы на уровне 0,05.

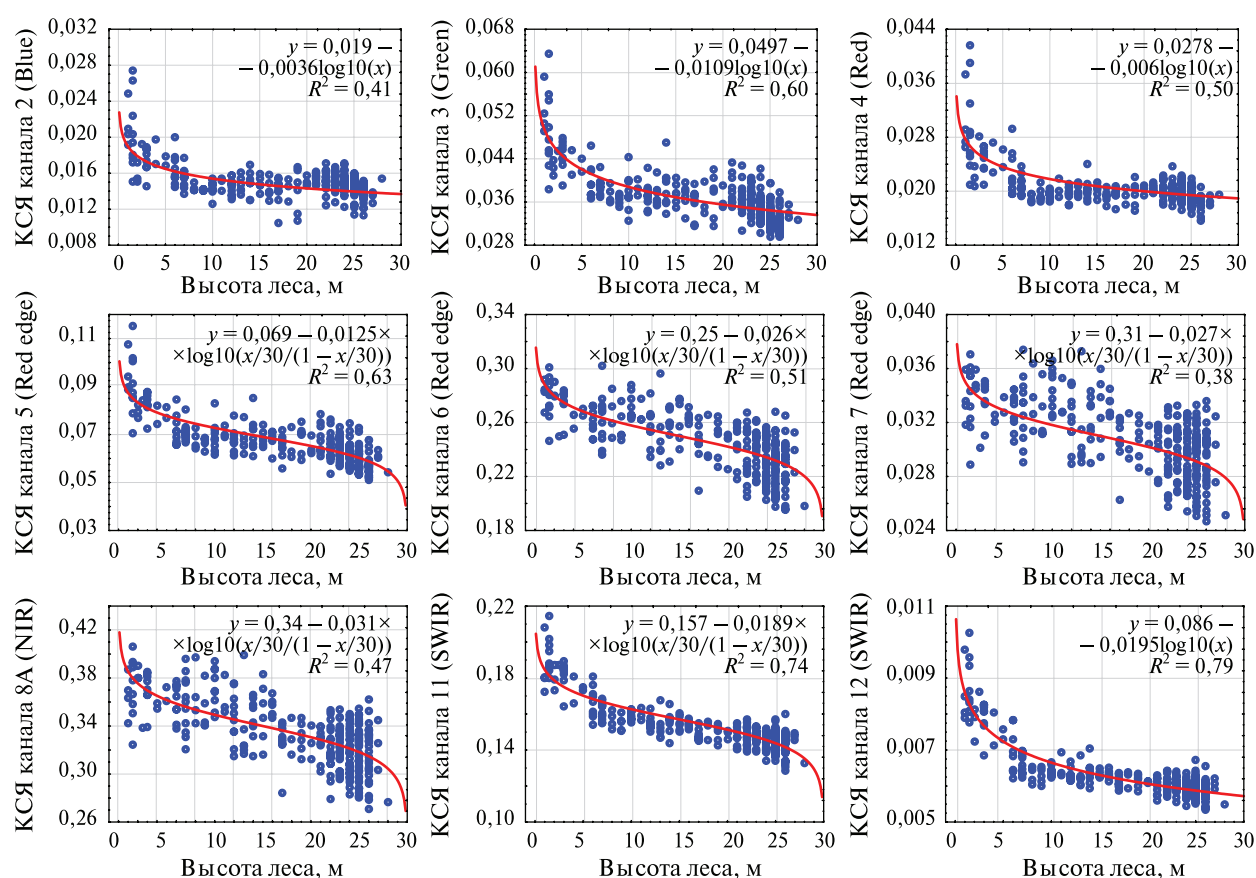


Рис. 3. Зависимость между высотой лесных насаждений с преобладанием дуба и коэффициентами спектральной яркости в каналах Sentinel-2

Таблица 3. Характеристики тесноты связи между высотой лесных насаждений с преобладанием дуба и их коэффициентами спектральной яркости по данным Sentinel-2

Коэффициент корреляции	Спектральные диапазоны Sentinel-2								
	Blue	Green	Red	Red edge1	Red edge2	Red edge3	NIR	SWIR1	SWIR2
Пирсона	–0,51	–0,71	–0,58	–0,76	–0,72	–0,63	–0,70	–0,83	–0,78
Спирмена	–0,41	–0,74	–0,53	–0,77	–0,70	–0,60	–0,64	–0,76	–0,75

Связь между высотой и спектральными характеристиками во всех изученных диапазонах Sentinel-2 обратная и криволинейная (рис. 3, см. с. 128). Она может быть описана логарифмической функцией, но приближается к логит-кривой.

Запас древесины для насаждений с преобладанием дуба ($\text{м}^3/\text{га}$) находится в обратной связи с отражательной способностью во всех спектральных диапазонах Sentinel-2 (табл. 4). Наиболее сильная связь со спектральной отражательной способностью характерна для SWIR-диапазонов (каналы 11, 12).

Таблица 4. Характеристики тесноты связи между запасом стволовой древесины в насаждениях с преобладанием дуба и коэффициентами спектральной яркости по данным Sentinel-2

Коэффициент корреляции	Спектральные диапазоны Sentinel-2								
	Blue	Green	Red	Red edge1	Red edge2	Red edge3	NIR	SWIR1	SWIR2
Пирсона	–0,44	–0,66	–0,51	–0,71	–0,71	–0,64	–0,70	–0,79	–0,73
Спирмена	–0,32	–0,65	–0,41	–0,70	–0,69	–0,60	–0,64	–0,74	–0,71

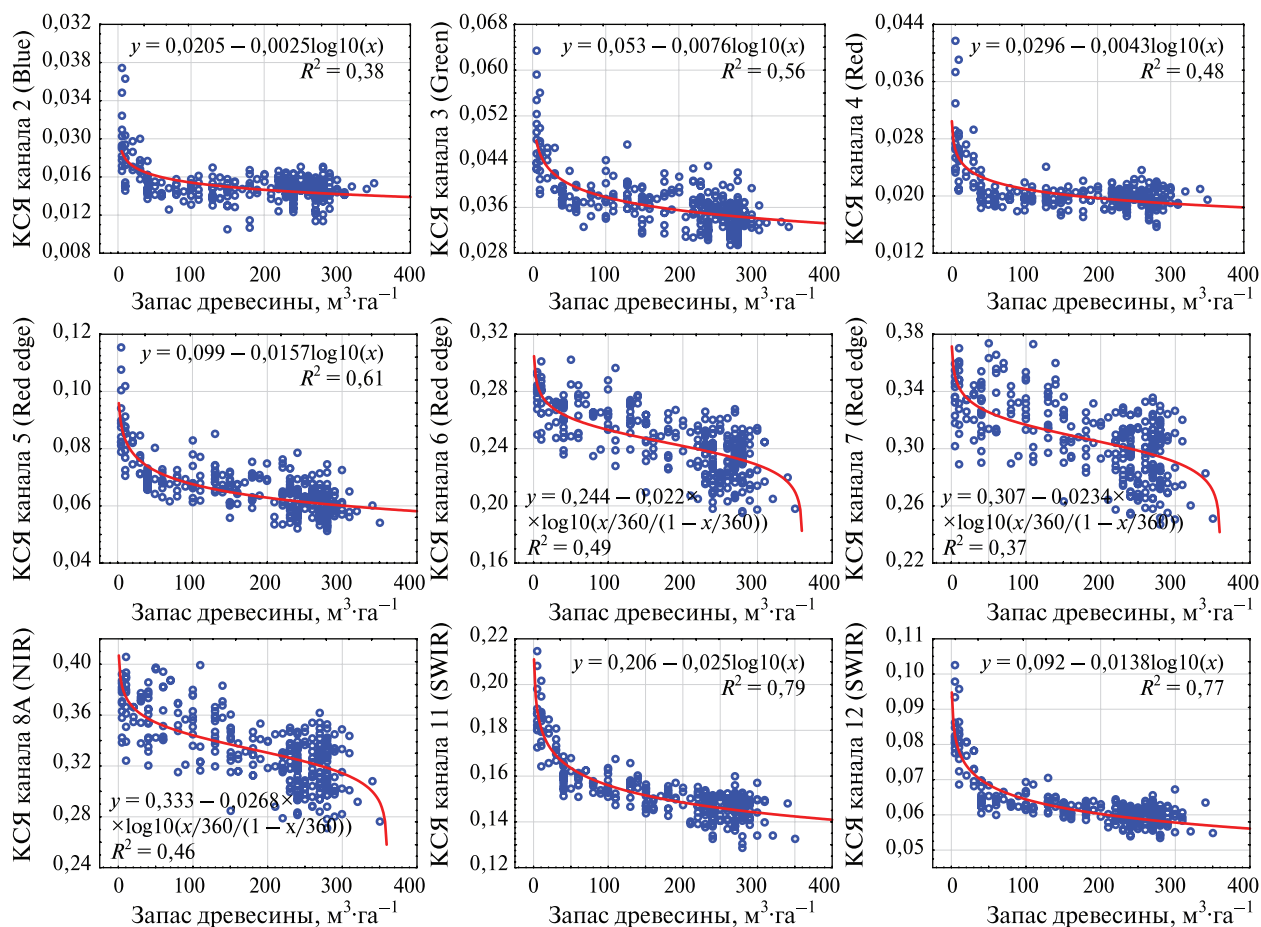


Рис. 4. Зависимость между запасом стволовой древесины и коэффициентами спектральной яркости в каналах Sentinel-2 (насаждения с преобладанием дуба)

Достаточно сильная связь с запасом стволовой древесины наблюдается также в каналах крайнего красного диапазона. Во всех случаях корреляции статистически значимы на уровне значимости 0,05. В сравнении с возрастом и высотой сила связи запаса древесины со спектрально-отражательными характеристиками несколько ниже.

В синем, зелёном, красном, 1-м крайнем красном и каналах SWIR-области зависимость между запасом древесины и спектральной отражательной способностью наиболее достоверно аппроксимируется логарифмической функцией (рис. 4, см. с. 129).

В остальных каналах крайней красной области (каналы 6, 7) и ближнем инфракрасном диапазоне (канал 8A) зависимость между запасом стволовой древесины и отражательной способностью более сложная и менее выраженная. Общей особенностью всех изученных параметров лесов (возраст, высота, запас) выступает наиболее сильная корреляция со спектральной отражательной способностью в SWIR-каналах Sentinel-2. То есть эти диапазоны прибора MSI наиболее информативны для оценок изменения перечисленных биометрических характеристик лесов, типичных для лесостепи с преобладанием дуба в верхних ярусах.

Для насаждений с преобладанием ясеня характерны близкие зависимости между возрастом леса и отражательной способностью во всех изученных каналах Sentinel-2, так же как и для лесных участков с преобладанием дуба. Исходя из более высоких значений коэффициента корреляции Спирмена, чем коэффициента корреляции Пирсона, связь во всех каналах криволинейная и наиболее сильная в 11-м (SWIR) канале Sentinel-2 (табл. 5).

Для лесных насаждений с преобладанием ясеня зависимость между возрастом и отражательной способностью в каналах Sentinel-2 наиболее достоверно аппроксимируется убывающей логарифмической функцией (рис. 5).

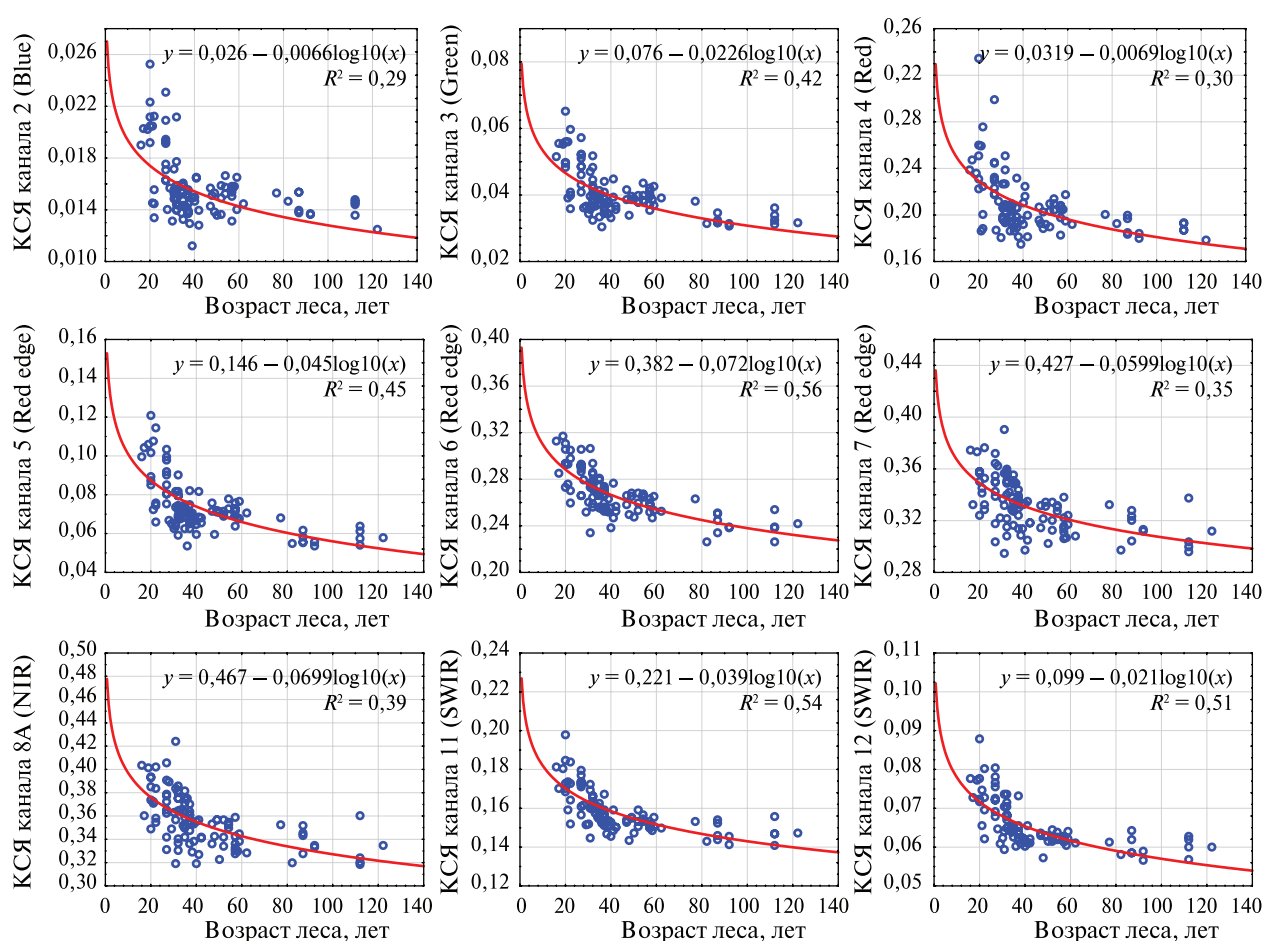


Рис. 5. Зависимости между возрастом лесных насаждений с преобладанием ясеня и коэффициентами спектральной яркости в каналах Sentinel-2

Таблица 5. Характеристики тесноты связи между возрастом лесных насаждений с преобладанием ясеня и их коэффициентами спектральной яркости по данным Sentinel-2

Коэффициент корреляции	Спектральные диапазоны Sentinel-2								
	Blue	Green	Red	Red edge1	Red edge2	Red edge3	NIR	SWIR1	SWIR2
Пирсона	–0,43	–0,57	–0,46	–0,59	–0,68	–0,54	–0,56	–0,63	–0,60
Спирмена	–0,49	–0,60	–0,55	–0,64	–0,76	–0,63	–0,66	–0,80	–0,78

Вместе с этим для лесных участков с преобладанием ясеня эффективность аппроксимации связи возраста и отражательной способности оказалась ниже, чем аналогичной связи для лесных насаждений с преобладанием дуба.

Зависимость между высотой леса и спектральной отражательной способностью насаждений с преобладанием ясеня также убывающая. В отличие от лесных насаждений с преобладанием дуба, для участков с преобладанием ясеня криволинейность связи выражена в меньшей степени. Это в том числе следует из примерно аналогичных значений коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена (табл. 6).

Меньшая выраженность криволинейности связи между высотой и отражательной способностью лесных насаждений с преобладанием ясеня заметна и при графическом анализе (рис. 6). Тем не менее наибольшая эффективность аппроксимации связи между высотой и КСЯ характерна для логарифмической, т. е. криволинейной, функции.

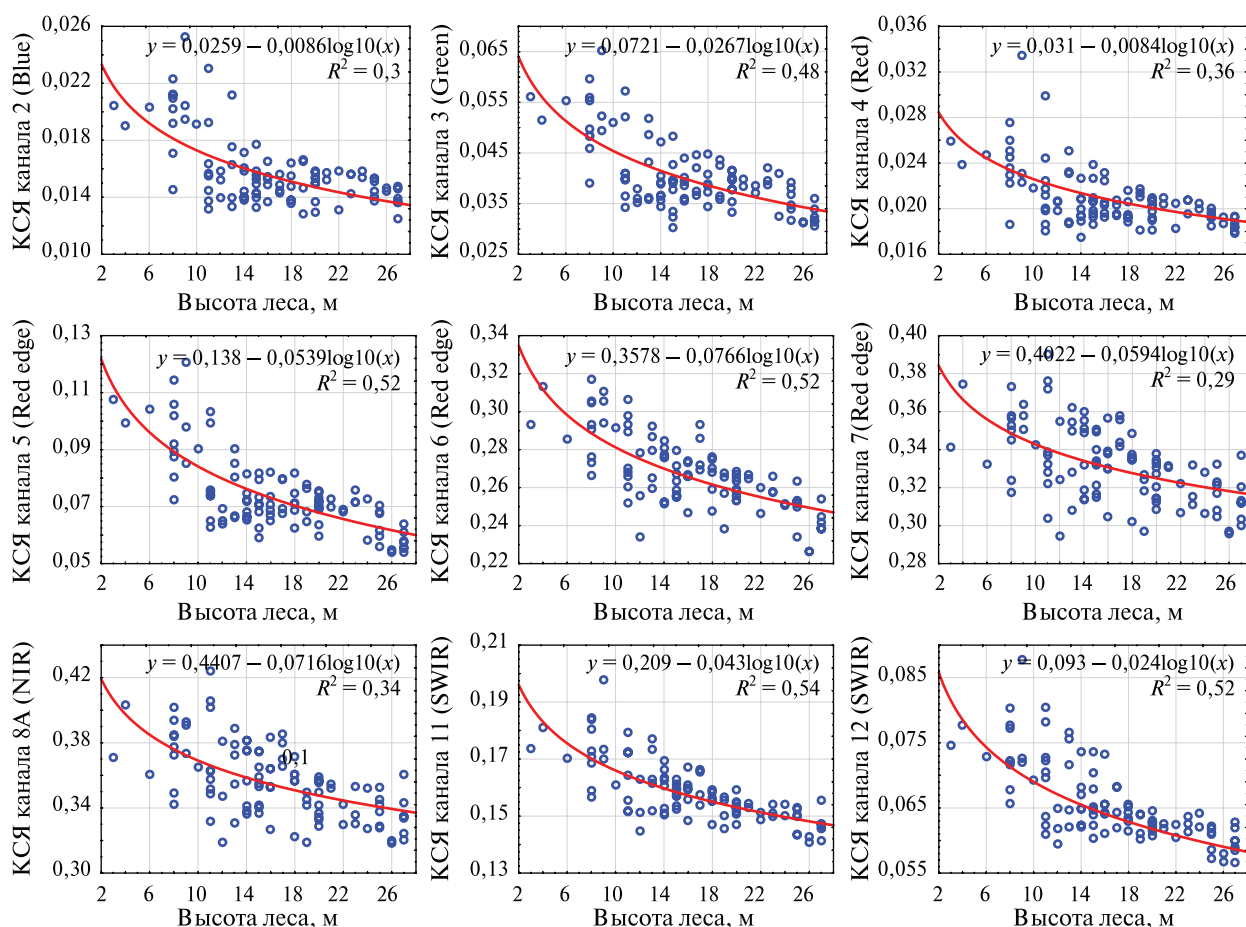


Рис. 6. Зависимость между высотой лесных насаждений с преобладанием ясеня и коэффициентами спектральной яркости в каналах Sentinel-2

Таблица 6. Характеристики тесноты связи между высотой лесных насаждений с преобладанием ясеня и их коэффициентами спектральной яркости по данным Sentinel-2

Коэффициент корреляции	Спектральные диапазоны Sentinel-2								
	Blue	Green	Red	Red edge1	Red edge2	Red edge3	NIR	SWIR1	SWIR2
Пирсона	−0,57	−0,66	−0,57	−0,69	−0,73	−0,57	−0,61	−0,74	−0,72
Спирмена	−0,47	−0,57	−0,54	−0,61	−0,70	−0,56	−0,59	−0,74	−0,73

Насаждения с преобладанием ясеня, так же как и насаждения с преобладанием дуба, характеризуются обратной связью между запасом стволовой древесины и спектральной отражательной способностью (табл. 7). Она наиболее сильно проявляется в каналах 11 и 12 Sentinel-2.

Таблица 7. Характеристики тесноты связи между запасом древесины в насаждениях с преобладанием ясеня и коэффициентами спектральной яркости по данным Sentinel-2

Коэффициент корреляции	Спектральные диапазоны Sentinel-2								
	Blue	Green	Red	Red edge1	Red edge2	Red edge3	NIR	SWIR1	SWIR2
Пирсона	−0,53	−0,61	−0,53	−0,64	−0,72	−0,59	−0,64	−0,74	−0,71
Спирмена	−0,43	−0,55	−0,49	−0,59	−0,71	−0,60	−0,64	−0,75	−0,73

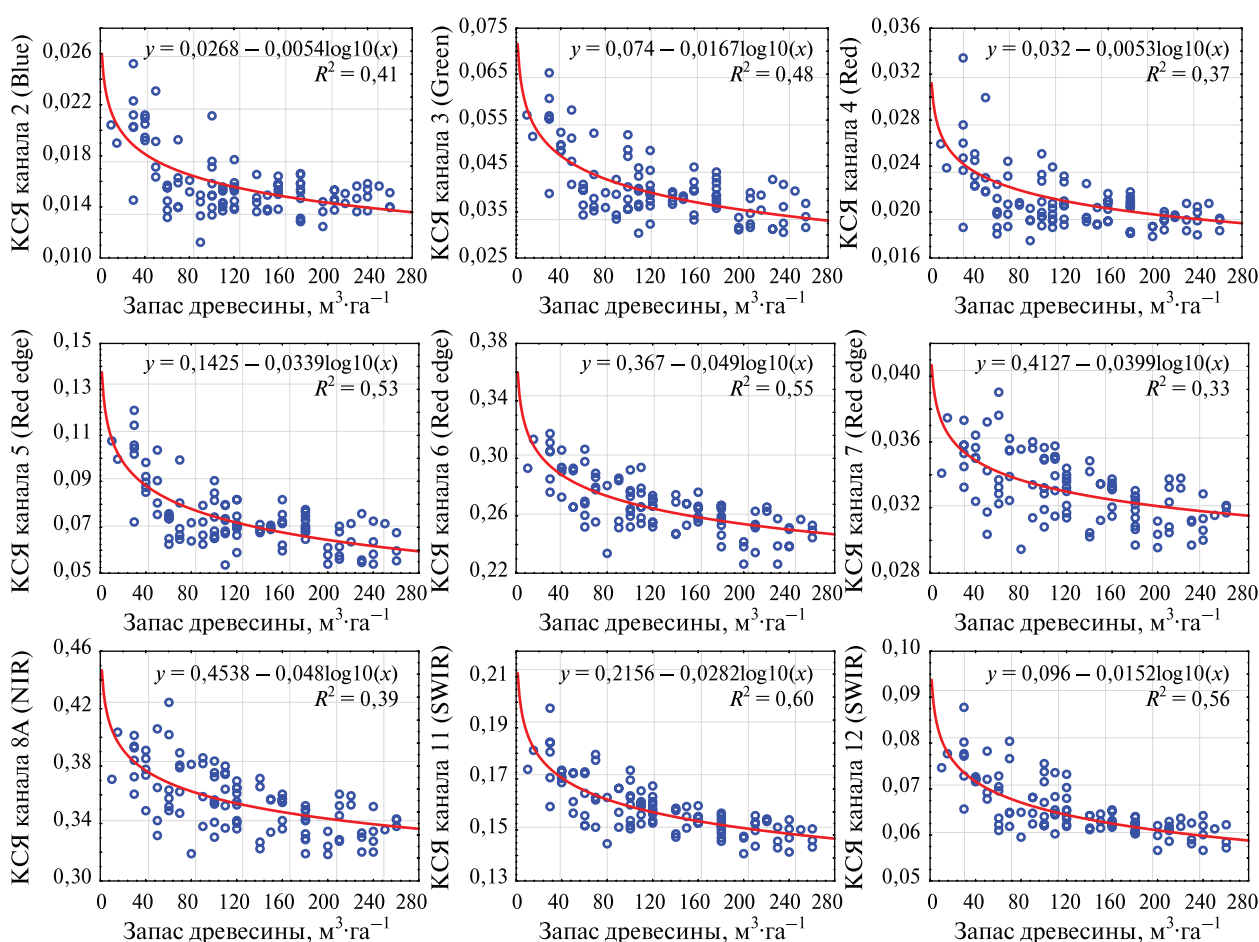


Рис. 7. Зависимость между запасом стволовой древесины и коэффициентами спектральной яркости в каналах Sentinel-2 (насаждения с преобладанием ясеня)

Во всех анализируемых диапазонах связь между запасом древесины и отражательной способностью для лесных насаждений с преобладанием ясеня наиболее достоверно может быть аппроксимирована убывающей логарифмической кривой (рис. 7, см. с. 132).

Сопоставление спектрально-отражательных характеристик для классов возраста леса (класс возраста — 20 лет), проведённое для лесных насаждений с преобладанием дуба и ясеня, показало общие закономерности их изменения по мере увеличения возраста насаждений. Вместе с этим для лесных участков с преобладанием ясеня в большинстве классов возраста, за исключением самого молодого 1-го класса, характерны несколько более высокие значения отражательной способности, чем для лесных участков с преобладанием дуба (рис. 8).

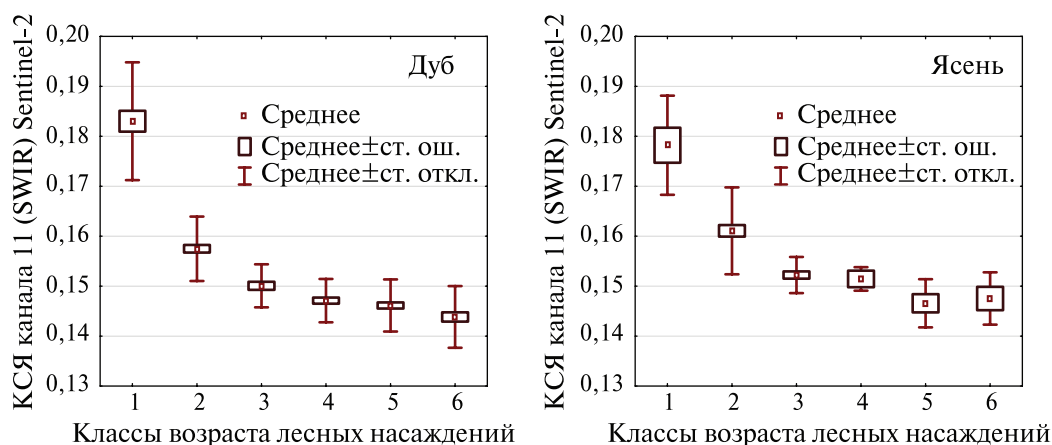


Рис. 8. Спектрально-отражательные характеристики SWIR-диапазона (11-й канал) Sentinel-2 для классов возраста лесов с преобладанием дуба и ясеня

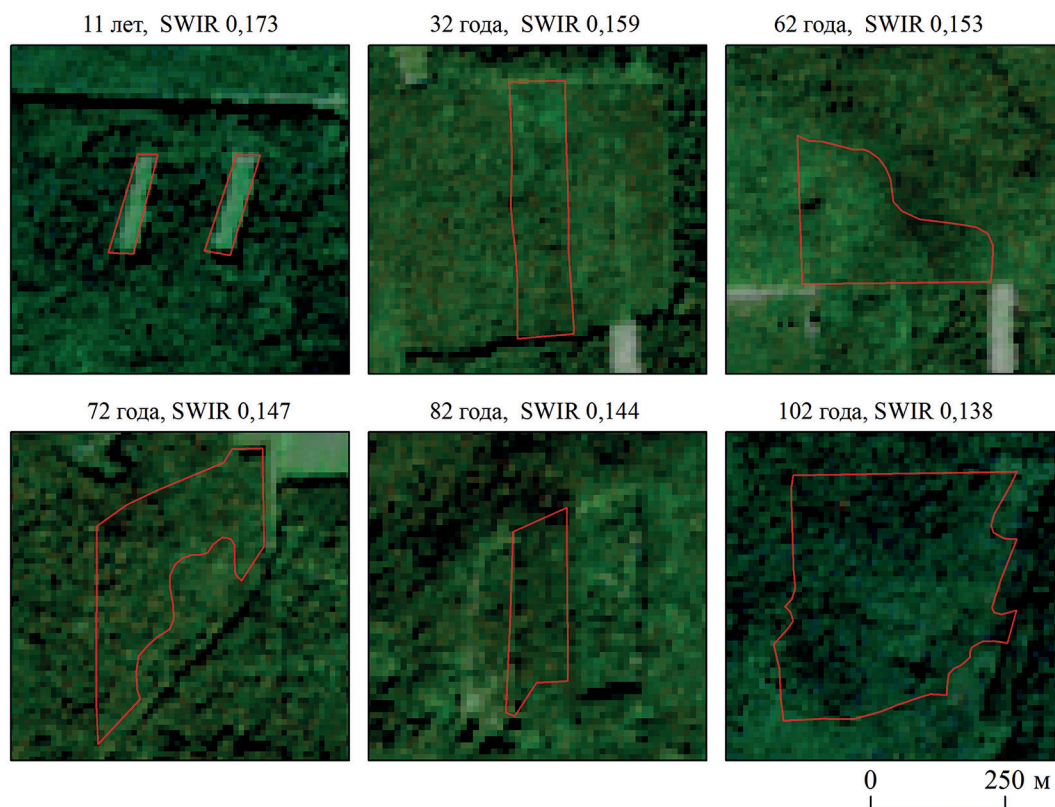


Рис. 9. Примеры лесных участков (преобладание дуба) разного возраста на снимке Sentinel-2 от 26.08.2015 и значения отражательной способности в SWIR-диапазоне. Синтез каналов Red-Green-Blue (4-3-2)

Сравнение спектрально-отражательных характеристик (SWIR-диапазон) насаждений с преобладанием дуба и лесных насаждений с преобладанием ясеня одних и тех же классов возраста, проведенное на основе Т-критерия Стьюдента, показало, что статистически значимые различия между ними характерны для насаждений 2-го (20–40 лет) и 3-го (40–60 лет) классов возраста. В лесных насаждениях остальных классов возраста статистически значимых различий между ними не выявлено.

Общая закономерность снижения отражательной способности насаждений по мере увеличения возраста леса может быть обусловлена изменением морфологии лесного полога и биологическими особенностями более старовозрастных участков. Снижение яркости наглядно проявляется при визуальном анализе насаждений разного возраста на снимках Sentinel-2 в варианте синтеза каналов видимого диапазона (красный-зелёный-синий (4-3-2)) с пространственным разрешением 10 м (рис. 9, см. с. 133). Повышение возраста лесных массивов, сопровождающееся снижением значений их отражательной способности, приводит к тому, что более старые насаждения выглядят более тёмными в сравнении с участками более молодого леса. Наиболее заметны различия между самыми молодыми (0–20 лет) и самыми старыми (80–100 и 100–120 лет) насаждениями. Лесные участки 2-го (20–40 лет) и 3-го (40–60 лет) классов возраста достаточно заметно отличаются от лесов старше 80 лет.

Из рис. 9 видно, что различия между молодыми и старыми лесными насаждениями аналогичного породного состава (преобладание дуба) проявляются на снимках Sentinel-2 не только в яркости, но и текстуре изображения при её анализе в комбинации каналов самого высокого пространственного разрешения.

Выводы

Спектрально-отражательные характеристики каналов видимого и инфракрасного диапазонов Sentinel-2 находятся в обратной зависимости от возраста, высоты и запаса стволовой древесины лесов, типичных для юга Среднерусской лесостепи. Повышение возраста лесных массивов с преобладанием дуба сопровождается в большинстве спектральных диапазонов MSI снижением отражательной способности по логарифмической кривой либо может быть аппроксимировано логит-функцией. Повышение высоты и запаса древесины дубрав обуславливает снижение отражательной способности по логарифмической или логит-кривой. Лесные насаждения с преобладанием в верхних ярусах ясеня характеризуются во многом такими же зависимостями спектральной отражательной способности от возраста и высоты леса, что и лесные насаждения с преобладанием дуба. Но для лесных участков с преобладанием ясеня связь между биометрическими параметрами и коэффициентами спектральной яркости выражена в меньшей степени.

Литература

1. Бугаев В. А., Мусиевский А. Л., Царалунга В. В. Дубравы лесостепи. Воронеж: Воронежская гос. лесотехн. акад. 2013. 247 с.
2. Гаврилюк Е. А., Королева Н. В., Карпущина Д. А., Соколова Е. Н., Ершов Д. В. Геопространственное моделирование биометрических и структурных характеристик лесов Брянской области на основе спутниковых и выборочных лесотаксационных данных // Лесоведение. 2021. № 6. С. 609–626. DOI: 10.31857/S002411482106005X.
3. Дегтярь А. В., Григорьева О. И. Изменение лесистости Белгородской области за 400-летний период // Науч. ведомости Белгородского гос. ун-та. Сер.: Естественные науки. 2018. Т. 42. № 4 С. 574–586. DOI: 10.18413/2075-4671-2018-42-4-574-586.
4. Жарко В. О., Бартаев С. А., Егоров В. А. Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы PROBA-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 157–168. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168.
5. Жирин В. М., Князева С. В., Эйлина С. П. Эколого-динамическое исследование лесообразовательного процесса по космическим снимкам // Лесоведение. 2013. № 5. С. 76–85.

6. *Жирин В. М., Князева С. В., Эйшлин С. П.* Динамика спектральной яркости породно-возрастной структуры групп типов леса на космических снимках Landsat // *Лесоведение*. 2014. № 5. С. 3–12.
7. *Реуцкая В. В., Арефьев Ю. Ф.* Биоразнообразие и биоинтеграция в лесных экосистемах Среднерусской лесостепи // *Проблемы региональной экологии*. 2009. № 1. С. 125–129.
8. *Сочилова Е. Н., Ершов Д. В.* Анализ возможности определения запасов древесных пород по спутниковым данным Landsat ETM+ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 3. С. 277–282.
9. *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.
10. *Ahmed O. S., Franklin S. E., Wulder M. A., White J. C.* Characterizing stand-level forest canopy cover and height using Landsat time series, samples of airborne LiDAR, and the Random Forest algorithm // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015. V. 101. P. 89–101. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.11.007.
11. *Astola H., Häme T., Sirro L., Molinier M., Kilpi J.* Comparison of Sentinel-2 and Landsat-8 imagery for forest variable prediction in boreal region // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 223. P. 257–273. DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.019.
12. *Cardille J. A., Perez E., Crowley M. A., Wulder M. A., White J. C., Hermosilla T.* Multi-sensor change detection for within-year capture and labelling of forest disturbance // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 268. Art. No. 112741. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112741.
13. *Graf W., Kleinn C., Schall P., Nauss T., Detsch F., Magdon P.* Analyzing the relationship between historic canopy dynamics and current plant species diversity in the herb layer of temperate forests using long-term Landsat time series // *Remote Sensing of Environment* 2019. V. 232. Art. No. 111305. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111305.
14. *Hall R. J., Skakun R. S., Arsenault E. J., Case B. S.* Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume // *Forest Ecology and Management*. 2006. V. 225. No. 1–3. P. 378–390. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.01.014.
15. *Kimes D. S., Holben B. N., Nickeson J. E., McKee W. A.* Extracting forest age in a Pacific Northwest forest from Thematic Mapper and topographic data // *Remote Sensing of Environment*. 1996. V. 56. No. 2. P. 133–140. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00230-8.
16. *Kuusinen N., Tomppo E., Shuai Y., Berninger F.* Effects of forest age on albedo in boreal forests estimated from MODIS and Landsat albedo retrievals // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 145. P. 145–153. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.005.
17. *Li A., Huang C., Sun G., Shi H., Toney C., Zhu Z., Rollins M. G., Goward S. N., Masek J. G.* Modeling the height of young forests regenerating from recent disturbances in Mississippi using Landsat and ICESat data // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. No. 8. P. 1837–1849. DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.001.
18. *Lu D.* The potential and challenge of remote sensing based biomass estimation // *Intern. J. Remote Sensing*. 2006. V. 27. No. 7. P. 1297–1328. DOI: 10.1080/01431160500486732.
19. *Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E.* Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin // *Forest Ecology and Management*. 2004. V. 198. No. 1. P. 149–167. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.03.048.
20. *Matasci G., Hermosilla T., Wulder M. A., White J. C., Coops N. C., Hobart G. W., Bolton D. K., Tompalski P., Bater C. W.* 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.
21. *Morresi D., Vitali A., Urbinati C., Garbarino M.* Forest Spectral Recovery and Regeneration Dynamics in Stand-Replacing Wildfires of Central Apennines Derived from Landsat Time Series // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 3. Art. No. 308. DOI: 10.3390/rs11030308.
22. *Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Hansen M. C., Kommareddy A., Pickens A., Turubanova S., Tang H., Silva C. E., Armston J., Dubayah R., Blair J. B., Hofton M.* Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data // *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 253. Art. No. 112165. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.
23. *Socha J., Pierzchalski M., Bałazy R., Ciesielski M.* Modelling top height growth and site index using repeated laser scanning data // *Forest Ecology and Management*. 2017. V. 406. P. 307–317. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.09.039.
24. *Zhang Y., Ling F., Wang X., Foody G. M., Boyd D. S., Li X., Du Y., Atkinson P. M.* Tracking small-scale tropical forest disturbances: Fusing the Landsat and Sentinel-2 data record // *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 261. Art. No. 112470. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112470.
25. *Zheng D., Rademacher J., Chen J., Crow T., Bresee M., Le Moine J., Ryu S.-R.* Estimating aboveground biomass using Landsat-7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA // *Remote Sensing of Environment*. 2004. V. 93. No. 3. P. 402–411. DOI: 10.1016/j.rse.2004.08.008.

Relationships between forest stand parameters and Sentinel-2 spectral reflectance in the Central Russian forest-steppe

E. A. Terekhin

Belgorod State National Research University, Belgorod 308015, Russia

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

The article presents results of relationships analysis between forest stand parameters (age, height, growing stock volume) and Sentinel-2 spectral reflectance in the Central Russian forest-steppe. The age of oak forests is inversely related to the reflectance in all spectral ranges. The strongest relationship between age and spectral response was found in the red and SWIR bands. The relationships between forest age and reflectance in all Sentinel-2 bands are curvilinear and are most reliably approximated by a logarithmic curve. The height and growing stock volume of oak forests are also in inverse, curvilinear dependence with spectral reflectance in all ranges. The relationship of the height of oak forests with the spectral response is stronger than with the age of the stand. Ash-dominated forests are characterized by similar relationships between age, forest height, and spectral reflectance, as for oak-dominated forests. For age and height of forests dominated by ash, the strongest relationship with the spectral reflectance values was also found for the Sentinel-2 SWIR bands.

Keywords: forest age, forest height, Central Russian forest-steppe, remote sensing data, Sentinel-2

Accepted: 28.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-124-137

References

1. Bugaev V. A., Musievskii A. L., Tsaralunga V. V., *Dubravyy lesostepi* (Oak forests of the forest-steppe), Voronezh: Voronezhskaya gosudarstvennaya lesotekhnicheskaya akademiya, 2013, 247 p. (in Russian).
2. Gavriluk E. A., Koroleva N. V., Karpukhina D. A., Sochilova E. N., Ershov D. V., Geospatial modeling of biometric and structural forest attributes in the Bryansk oblast based on satellite imagery and selective inventory data, *Lesovedenie*, 2021, No. 6, pp. 609–626 (in Russian), DOI: 10.31857/S002411482106005X.
3. Degtyar A. V., Grigoreva O. I., Development of land forests of the Belgorod region for the 400-year period, *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta, Ser.: Estestvennye nauki*, 2018, Vol. 42, No. 4, pp. 574–586 (in Russian), DOI: 10.18413/2075-4671-2018-42-4-574-586.
4. Zharko V. O., Bartalev S. A., Egorov V. A., Investigation of forest growing stock volume estimation possibilities over Russian Primorsky Krai region using Proba-V satellite data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 157–168 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168.
5. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Eidlina S. P., The eco-dynamical study of forest-forming process with space imagery, *Lesovedenie*, 2013, No. 5, pp. 76–85 (in Russian).
6. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Eydlina S. P., Dynamics of spectral brightness of the species/age structure for groups of forest types on Landsat satellite images, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 788–796, DOI: 10.1134/S1995425514070142.
7. Reutskaya V. V., Arefev Yu. F., Biodiversity and biointegration in the forest ecosystems of the Middle-Russian forest-steppe, *Problemy regional'noi ekologii*, 2009, No. 1, pp. 125–129 (in Russian).
8. Sochilova E. N., Ershov D. V., Possibility analysis of stem volume of forests assessment using Landsat ETM data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 277–282 (in Russian).
9. 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.
10. Ahmed O. S., Franklin S. E., Wulder M. A., White J. C., Characterizing stand-level forest canopy cover and height using Landsat time series, samples of airborne LiDAR, and the Random Forest algorithm, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, Vol. 101, pp. 89–101, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.11.007.
11. Astola H., Häme T., Sirro L., Molinier M., Kilpi J., Comparison of Sentinel-2 and Landsat-8 imagery for forest variable prediction in boreal region, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 223, pp. 257–273, DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.019.

12. Cardille J. A., Perez E., Crowley M. A., Wulder M. A., White J. C., Hermosilla T., Multi-sensor change detection for within-year capture and labelling of forest disturbance, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 268, Art. No. 112741, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112741.
13. Graf W., Klein C., Schall P., Nauss T., Detsch F., Magdon P. P., Analyzing the relationship between historic canopy dynamics and current plant species diversity in the herb layer of temperate forests using long-term Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 232, Art. No. 111305, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111305.
14. Hall R. J., Skakun R. S., Arsenault E. J., Case B. S., Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume, *Forest Ecology and Management*, 2006, Vol. 225, No. 1–3, pp. 378–390, DOI: 10.1016/j.foreco.2006.01.014.
15. Kimes D. S., Holben B. N., Nickeson J. E., McKee W. A., Extracting forest age in a Pacific Northwest forest from Thematic Mapper and topographic data, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 56, No. 2, pp. 133–140, DOI: 10.1016/0034-4257(95)00230-8.
16. Kuusinen N., Tomppo E., Shuai Y., Berninger F., Effects of forest age on albedo in boreal forests estimated from MODIS and Landsat albedo retrievals, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 145, pp. 145–153, DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.005.
17. Li A., Huang C., Sun G., Shi H., Toney C., Zhu Z., Rollins M. G., Goward S. N., Masek J. G., Modeling the height of young forests regenerating from recent disturbances in Mississippi using Landsat and ICESat data, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, No. 8, pp. 1837–1849, DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.001.
18. Lu D., The potential and challenge of remote sensing based biomass estimation, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, No. 7, pp. 1297–1328, DOI: 10.1080/01431160500486732.
19. Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E., Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin, *Forest Ecology and Management*, 2004, Vol. 198, No. 1, pp. 149–167, DOI: 10.1016/j.foreco.2004.03.048.
20. Matasci G., Hermosilla T., Wulder M. A., White J. C., Coops N. C., Hobart G. W., Bolton D. K., Tompalski P., Bater C. W., 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.
21. Morresi D., Vitali A., Urbinati C., Garbarino M., Forest Spectral Recovery and Regeneration Dynamics in Stand-Replacing Wildfires of Central Apennines Derived from Landsat Time Series, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 3, Art. No. 308, DOI: 10.3390/rs11030308.
22. Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Hansen M. C., Kommareddy A., Pickens A., Turubanova S., Tang H., Silva C. E., Armston J., Dubayah R., Blair J. B., Hofton M., Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 253, Art. No. 112165, DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.
23. Socha J., Pierzchalski M., Bałazy R., Ciesielski M., Modelling top height growth and site index using repeated laser scanning data, *Forest Ecology and Management*, 2017, Vol. 406, pp. 307–317, DOI: 10.1016/j.foreco.2017.09.039.
24. Zhang Y., Ling F., Wang X., Foody G. M., Boyd D. S., Li X., Du Y., Atkinson P. M., Tracking small-scale tropical forest disturbances: Fusing the Landsat and Sentinel-2 data record, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 261, Art. No. 112470, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112470.
25. Zheng D., Rademacher J., Chen J., Crow T., Bresee M., Le Moine J., Ryu S.-R., Estimating aboveground biomass using Landsat-7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA, *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 93, No. 3, pp. 402–411, DOI: 10.1016/j.rse.2004.08.008.