

DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.2.05
УДК 630.5

Автоматизированное выявление низкополотных насаждений зоны смешанных лесов с применением спутниковых данных среднего разрешения на примере Учебно-опытного лесхоза БГТУ

В.В. Вечеров

«Заплеспроект», филиал ФГБУ «Рослесинфорг», ведущий инженер,
кандидат сельскохозяйственных наук, г. Брянск, Российская Федерация,
vecherovvv32@gmail.com

В.И. Дзубан

Управление лесами Брянской области, начальник управления,
г. Брянск, Российская Федерация,
dzu-vladimir@mail.ru

Ю.И. Перепечина

Брянский государственный инженерно-технологический университет, профессор кафедры
«Лесное дело», доктор сельскохозяйственных наук, г. Брянск, Российская Федерация,
lhf_bryansk@mail.ru

В.И. Шошин

Брянский государственный инженерно-технологический университет, кандидат
сельскохозяйственных наук, г. Брянск, Российская Федерация,
VlShoshin44@gmail.com

Относительная полнота – один из важнейших таксационных показателей, позволяющий определять запас насаждения и характеризовать его состояние.

В работе проанализирована возможность автоматизированного выявления низкополотных насаждений, пройденных выборочными санитарными рубками, по показателю сомкнутости лесного полога (FCD) на основании данных среднего пространственного разрешения Sentinel-2.

Для ссылок: <http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.2.05>
Автоматизированное выявление низкополотных насаждений зоны смешанных лесов с применением спутниковых данных среднего разрешения на примере Учебно-опытного лесхоза БГТУ / В.В. Вечеров, В.И. Дзубан, Ю.И. Перепечина, В.И. Шошин. – DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.2.05. – Текст : электронный // Лесхоз. информ. : электрон. сетевой журн. – 2020. – № 2. – С. 54–65. URL: <http://lhi.vniilm.ru/>

В результате корреляционно-регрессионного анализа связи наземных данных и данных, полученных из карт сомкнутости лесного полога, выявлена сильная экспоненциальная зависимость ($r = 0,787$, $R^2 = 0,829$ при $p\text{-value} < 0,001$) между показателем FCD и относительной полнотой древостоя. На основании установленной зависимости созданы карты относительной полноты для лесных участков, пройденных выборочными санитарными рубками.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, низкополнотные насаждения, вегетационный индекс, forest canopy density, QGIS

Для оценки плотности стояния деревьев в лесном хозяйстве применяют понятие «полнота древостоя», под которым понимают показатель, характеризующий степень использования деревьями занимаемого ими пространства [1]. Относительная полнота – один из важнейших таксационных показателей, позволяющий определять запас насаждения и характеризовать его состояние. Таким образом, относительная полнота древостоя выступает в качестве характеристики фактической продуктивности того или иного насаждения [2].

Существует 3 различных подхода к определению или расчёту относительной полноты насаждений: а) непосредственные натурные измерения на пробных площадях; б) статистический метод, для которого необходимы данные о сумме площадей поперечных сечений или среднем диаметре древостоя и числе стволов на 1 га; в) применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Наземные и статистические методы при их практическом применении требуют трудоёмких вычислений и значительных затрат. Именно поэтому в настоящее время особую значимость для мониторинга состояния земель лесного фонда приобрели современные и доступные методы дистанционного зондирования. Дистанционное зондирование Земли – процесс или метод получения информации об объекте, участке поверхности или явлении путем анализа данных, собранных без контакта с изучаемым объектом [3]. Преимущества данных дистанционного зондирования Земли при изучении динамики лесных сообществ объясняются, прежде всего, их «первичностью» по сравнению картографическими материалами, а также возможностью извлекать разную, в зависимости от необходимости, информацию [4]. В данной работе для оценки относительной полноты древостоев с целью выявления низкополотных насаждений использован метод картирования по показателю сомкнутости лесного полога (Forest Canopy Density – FCD) на основании данных среднего пространственного разрешения Sentinel-2 [5]. Показатель FCD является удобным

в применении индикатором для оценки сомкнутости древесной растительности и состояния лесов при использовании данных космической съёмки [6, 7]. Преимущество этого метода заключается в возможности моделирования густоты крон (сомкнутости) без наземных тренировочных данных. Показатель густоты полога FCD выражается в процентах для каждого пикселя изображения, что позволяет, используя полевые данные и регрессионный анализ, составлять попиксельные карты относительной полноты древостоев.

Цель исследования – проанализировать возможность автоматизированного выявления низкополотных насаждений, пройденных выборочными санитарными рубками.

Решаемые задачи:

- ✓ характеристика способов автоматизированной оценки густоты лесного полога;
- ✓ создание карт по показателю сомкнутости лесного полога (FCD) на основе данных среднего пространственного разрешения Sentinel-2;
- ✓ статистический регрессионный анализ наземных данных и данных, полученных из карт сомкнутости лесного полога, с целью установления зависимости между показателем FCD и относительной полнотой древостоя;
- ✓ создание карты относительной полноты для лесных участков, пройденных выборочными санитарными рубками.

Объекты и методы исследований

Объект исследования – Учебно-опытный лесхоз Брянского государственного инженерно-технологического университета (БГИТУ), находящийся на территории Брянского лесного массива [8]. Для Брянского лесного массива характерна большая пестрота почвенного покрова и неоднородность лесоводственно-таксационных показателей насаждений [9]. Это осложняет применение ДЗЗ для выявления насаждений, изреженных в результате санитарно-оздоровительных

мероприятий (СОМ). В качестве натуральных объектов на территории Учебно-опытного лесхоза БГТУ отобрано 20 лесотаксационных выделов, отличающихся породным составом насаждений, возрастом и интенсивностью изреживания (табл. 1).

Для автоматизированного выявления низкополнотных насаждений, пройденных выборочными санитарными рубками, применяли материалы бесплатной съёмки среднего разрешения Sentinel-2, которая на данный момент является наилучшей комбинацией высокого

спектрального (13 каналов), пространственного (10–20 м/пкс) и временного разрешения (5 сут для одной и той же территории) [10].

Учитывая, что лесные насаждения являются динамической экосистемой, для оценки трендов взаимосвязи показателя относительной полноты древостоя и показателя FCD использованы 3 разносезонные сцены Sentinel-2 – поздневесенняя (25 мая 2019 г.), летняя (14 июня 2019 г.) и раннеосенняя (9 сентября 2019 г.).

В ходе натуральных работ в мае 2019 г. заложено 20 круговых пробных площадей постоянного

ТАБЛИЦА 1. ТАКСАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБНЫХ ПЛОЩАДЕЙ

№ п/п	КООРДИНАТЫ ЦЕНТРА (WGS84)		КВАРТАЛ	ВЫДЕЛ	СОСТАВ ПО ЯРУСАМ	ВОЗРАСТ, ЛЕТ	ВЫСОТА, М	ДИАМЕТР, СМ	КЛАСС БОНИТЕТА	ТЛ ¹ ТЛУ ²	ОТН. ПОЛНОТА
	Х	У									
1	34.462994	53.411515	52	6	10С	170	29,0	68,0	I	КИСЗ С ₃	0,1
2	34.461519	53.409710	52	10	6СЗД1Кл+Лп	160	31,5	66,0	I	ЛЩКП D ₃	0,44
3	34.459955	53.412852	52	1	I 7ЛпЗКл II 6Е4Вз	110	24,6 1,6	32,2 20,0	I	ЛЩКП D ₂	0,27 0,02
4	34.459051	53.411683	52	5	I 4ЯсЗЛпЗС II 10Д ед. Вз	170	33,3 24,7	35,9 41,8	I	ЛЩКП D ₂	0,47 0,34
5	34.401389	53.396924	74	5	10С	160	33,0	44,0	I	ОРЛ С ₂	0,1
6	34.407975	53.392086	87	2	10С	140	33,7	46,0	I	ЛИП С ₃	0,11
7	34.421431	53.390059	89	10	7СЗЕ+Б	180	33,3	48,0	I	ЛИП С ₂	0,1
8	34.424389	53.389596	89	15	9С1Е+Б	170	34,0	52,0	I	ЛИП С ₂	0,3
9	34.403754	53.379453	111	19	7СЗЕ+ДН+Б	170	32,0	44,0	I	ЛИП С ₃	0,3
10	34.450152	53.434168	4	1	5СЗЕ1Д10с	110	33,4	58,0	Ia	ЛИП С ₃	0,39
11	34.453234	53.433755	4	5	I 8С2Лп II 10Д	110 60	34,1 20,0	50,0 24,0	Ia	ЛИП С ₃	0,48 0,05
12	34.444768	53.417882	39	1	I 7СЗБ II 10Лп	150 50	40,0 17,0	56,0 16,0	Ia	ЛЩКП D ₃	0,12 0,01
13	34.415700	53.399128	66	15	I 10С II 10Лп	190	35,8 16,0	47,0 20,0	I	ЛИП С ₃	0,27 0,02
14	34.424983	53.399987	67	8	ЗДЗЕ2Олч2Кл	180	28,5	28,0	I	ЛЩКП D ₃	0,19
15	34.398794	53.385284	98	2	5СЗЕ2Е	140	31,0	40,0	I	ОРЛ С ₂	0,38
16	34.462994	53.411515	52	6	5С5Е+Кл+Д	170	35,0	52,0	I	КИСЗ С ₃	0,4

№ п/п	КОординаты ЦЕНТРА (WGS84)		КВАР-ТАЛ	ВЫДЕЛ	СОСТАВ ПО ЯРУСАМ	ВОЗРАСТ, ЛЕТ	ВЫСОТА, М	ДИАМЕТР, СМ	КЛАСС БОНИ-ТЕТА	ТЛ ¹ ТЛУ ²	Отн. полнота
	Х	У									
17	34.461710	53.409815	52	10	4С4Е2Кл	160	33,0	48,0	I	ЛЩКП D ₃	0,4
18	34.427366	53.402061	68	1	I 10С II 5Кл5Лп	130	34,5 14,0	45,7 16,0	I	ЛИП С ₂	0,27 0,02
19	34.428674	53.401181	68	6	10С	190	30,0	32,0	I	ЛИП С ₂	0,05
20	34.463919	53.406496	62	8	9С1Лп	150	37,5	36,0	Ia	ЛИП С ₃	0,19

¹ ТЛ – тип леса: КИСЗ – кислично-зеленчуковый, ЛЩКП – лещиново-копытеневый, ОРЛ – орляковый, ЛИП – липняковый.

² ТЛУ – тип лесорастительных условий: С₂ – свежая сложная суборь, С₃ – влажная сложная суборь, D₂ – свежая дубрава, D₃ – влажная дубрава.

радиуса ($R=17,8$ м, $S=1000$ м²) в насаждениях различной полноты (0,1–0,5), пройденных выборочными санитарными рубками. Характеристика пробных площадей приведена в табл. 1.

Картирование сомкнутости лесного полога по FCD основано на нескольких индикаторах: улучшенный вегетационный индекс (AVI), индекс оголенности почвы (BI) и индекс затененности древесного полога (SI) [7, 11] (табл. 2). Расчёт вегетационных индексов проводился попиксельно с применением растрового калькулятора в QGIS.

Перед процедурой расчёта индексов была проведена атмосферная и радиометрическая коррекция съёмки в QGIS (модуль SCP), а также нормализация данных с применением линейной трансформации [12].

Улучшенный вегетационный индекс (AVI) характеризует величину биомасс и очень чувствителен к изменениям в густоте полога растительности благодаря усилению отражения в инфракрасном диапазоне, в отличие от широко применяемого вегетационного индекса [13].

Индекс оголенности почвы (BI) позволяет разделять растительность, расположенную на различных почвах, благодаря тому, что красный канал реагирует на минеральное строение почв, а ближний инфракрасный и зелёный канал характеризуют растительность [13, 14].

Индекс затененности древесного полога (SI) позволяет оценить степень затененности крон древостоя, что служит признаком для разделения насаждений как по возрасту (молодые насаждения имеют низкие значения индекса), так и по сомкнутости (сомкнутые насаждения имеют низкую степень затенения); выражается в процентах [15].

Показатель сомкнутости лесного полога FCD рассчитывался попиксельно в растровом калькуляторе QGIS по формуле:

$$FCD = [(VD \times SI + 1)^{1/2}] - 1,$$

где VD – показатель густоты растительности (первая компонента преобразованного по методу главных компонент (PCA) композитного изображения из растров AVI и BI), % [7].

Таблица 2. Индикаторы, используемые при моделировании густоты древесного полога

Индикатор	Формула расчёта*
Улучшенный вегетационный индекс (AVI)	$AVI = [B4 \times 256 - B3] \times (B4 - B3)^{1/3}$
Индекс оголенности почвы (BI)	$BI = \{[(B4 + B2) - B3] / [(B4 + B2) + B3]\}$
Индекс затененности древесного полога (SI)	$SI = [(256 - B1) \times (256 - B2) \times (256 - B3)]^{1/3}$

* B1 – синий канал космоснимка, B2 – зелёный канал, B3 – красный канал, B4 – ближний инфракрасный канал.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований составлена карта сомкнутости древесного полога насаждений Учебно-опытного лесхоза БГТУ. Согласно полученным данным (рис. 1), наибольшую долю среди древостоев с низкой сомкнутостью составляют хвойные насаждения с преобладанием ели европейской (*Picea abies* L.) в составе. Это связано с проведением санитарно-оздоровительных мероприятий вследствие увеличения площади насаждений, поврежденных короедом-типографом. Предыдущее исследование, посвященное глазомерному выявлению низкополнотных хвойных насаждений после проведения СОМ, показало, что чрезмерное изреживание при выборочных санитарных рубках (ВСР) приводит к замедлению восстановления природоохранных

функций лесов и на длительное время снижает их продуктивность [16].

После создания попиксельной карты сомкнутости лесного полога в программе QGIS пробным площадям присвоены полученные значения показателя FCD. Затем в среде RStudio проведен корреляционно-регрессионный анализ связи между показателем FCD и данными натурных обследований относительной полноты древостоя:

РЕЗУЛЬТАТ КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА СВЯЗИ МЕЖДУ FCD И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОЛНОТОЙ

Уравнение регрессии	$P=0,0024 \times e^{(0,0881 \times FCD)}$
Коэффициент корреляции, r	0,787
Коэффициент детерминации, R ²	0,829
F, при p-value < 0,001	10,57
Стандартная ошибка	±0,07

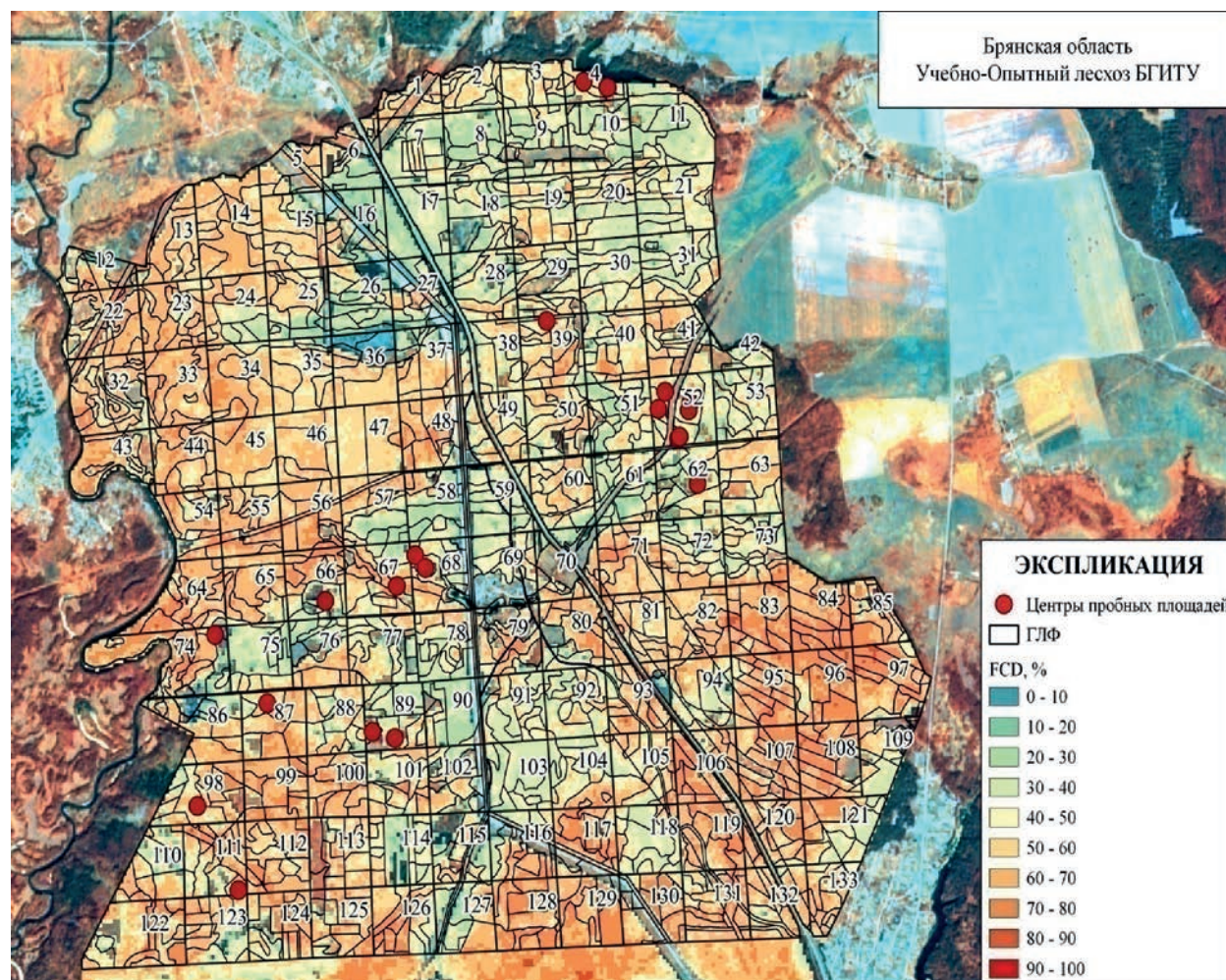


Рис. 1. Карта сомкнутости древесного полога (FCD, %) на территорию объекта исследований

Из-за ограниченного набора полевых натуральных данных, их неравномерного распределения по территории объекта работ, а также необходимости включения в модель высокополнотных лесных насаждений, проведена рандомизированная выборка 10-ти дополнительных выделов с относительной полнотой 0,6–1,0 по векторным данным последнего лесоустройства.

Таким образом, корреляционно-регрессионный анализ связи между показателем FCD и показателем относительной полноты древостоя выполнен по 30-ти независимым переменным (рис. 2), что многие авторы [17–19] считают достаточным условием репрезентативности выборочной совокупности.

Между показателем относительной полноты древостоя и величиной сомкнутости лесного полога имеется выраженная экспоненциальная зависимость. Значения коэффициентов корреляции ($r = 0,787$) и детерминации ($R^2 = 0,829$) близки к единице, что говорит о сильной зависимости относительной полноты от показателя FCD. Коэффициенты уравнения регрессии значимы на уровне $p\text{-value} < 0,001$.

Судя по значению коэффициента детерминации ($R^2 = 0,829$) для всех изучаемых насаждений, около 83% изменчивости относительной полноты древостоя обусловлено изменчивостью сомкнутости древесного полога, что коррелирует с увеличением показателя FCD.

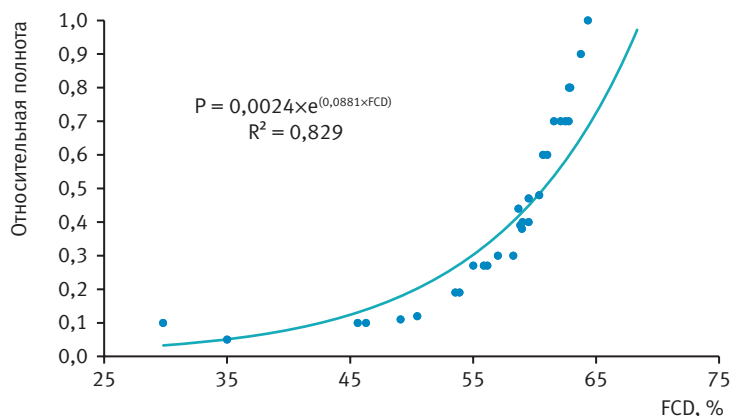


Рис. 2. График зависимости между относительной полнотой древостоев и показателем сомкнутости древесного полога (FCD, %) для территории объекта исследований

Оценка точности полученной регрессионной модели выполнена широко применяемым методом перекрёстной проверки ($k\text{-foldcross-validation}$) в среде RStudio (пакет DAAG). При его использовании имеющиеся натурные данные разбивают на k частей (в данной работе $k = 5$), затем на $k-1$ частях (т.е. на 25 независимых переменных) проводят обучение модели, а на оставшейся части – тестирование. Процедуру повторяли k раз, в итоге получили значение средней точности регрессионной модели, которое составило 0,96. Данный показатель значим при $p\text{-value} < 0,001$, что говорит о высокой точности полученной модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРЕКРЁСТНОЙ ПРОВЕРКИ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

Уравнение регрессии	$P = 0,0024 \times e^{(0,0881 \times FCD)}$
Средняя точность модели	0,96
F, при $p\text{-value} < 0,001$	169,00
Стандартная ошибка	$\pm 0,01$

После установления уравнения регрессии между показателями FCD и относительной полноты в программе QGIS с помощью модуля «Калькулятор растров» создана тематическая карта вычисленных значений относительной полноты на 20 отобранных для исследования лесотаксационных выделах. Затем в программе QGIS с помощью модуля SCP проведена неконтролируемая классификация полученной карты относительной полноты и последующая фильтрация и векторизация классифицированной тематической карты относительной полноты древостоев, пройденных выборочными санитарными рубками (табл. 3, рис. 3).

Согласно данным табл. 5, среди насаждений, пройденных выборочными санитарными рубками, наибольшая доля приходится на древостой с полнотой 0,3 (42,9%). Значительную площадь (8,45 га, или 14,9% обследованных насаждений) занимают прогаины (относительная полнота 0,1 и менее), пригодные для создания лесных культур с целью повышения продуктивности насаждений.

Таблица 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ ДРЕВОСТОЕВ, ПРОЙДЕННЫХ ВСР, ПО ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОЛНОТЕ

Относительная полнота	Площадь	
	га	%
<0,1	3,41	6,0
0,1	5,04	8,9
0,2	9,23	16,3
0,3	24,32	42,9
0,4	10,03	17,7
0,5	3,45	6,1
0,6	0,84	1,5
0,7	0,39	0,6
Итого	56,71	100

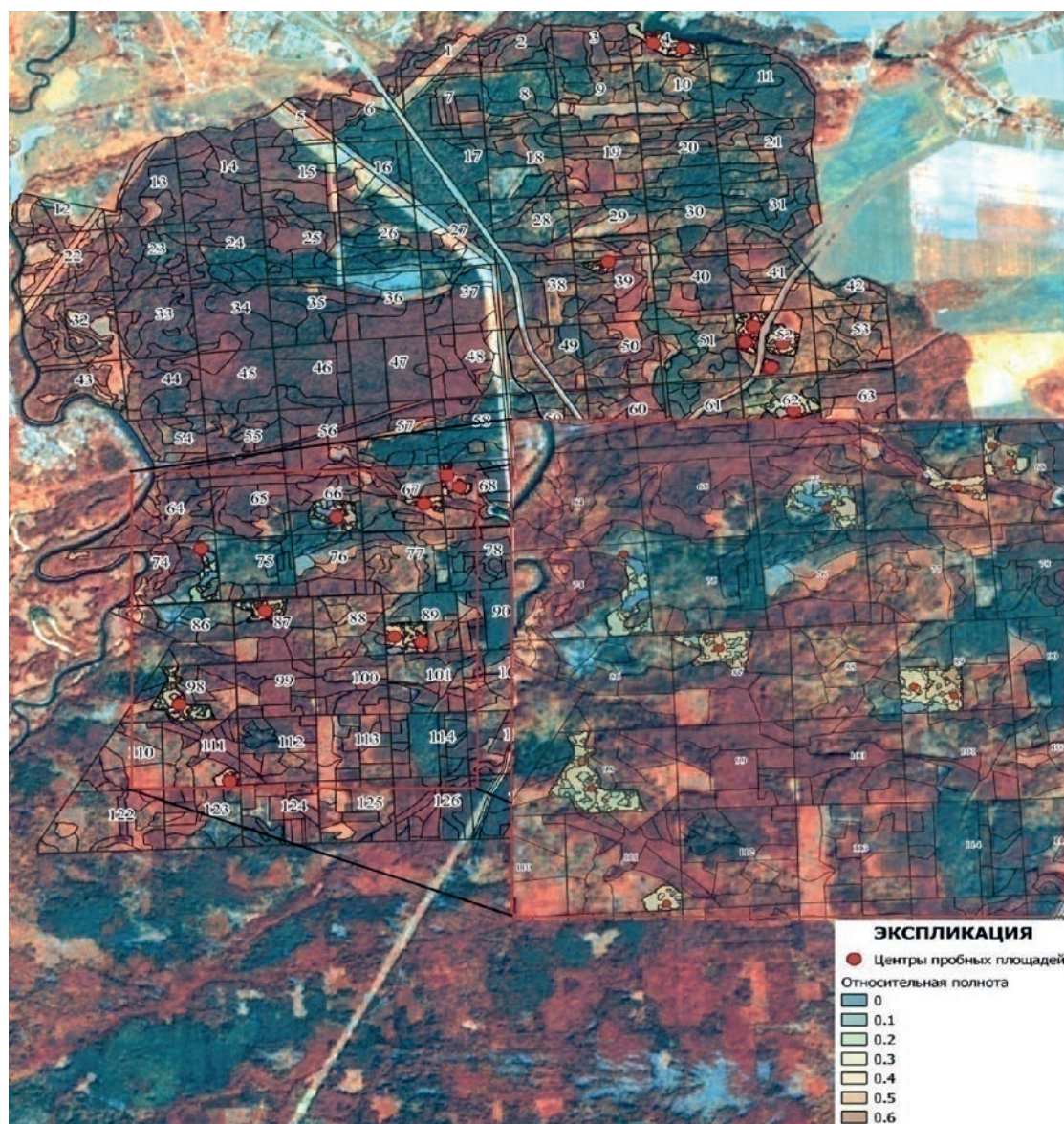


Рис. 3. КАРТА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОЛНОТЫ НАСАЖДЕНИЙ, ПРОЙДЕННЫХ ВЫБОРОЧНЫМИ САНИТАРНЫМИ РУБКАМИ, НА ТЕРРИТОРИЮ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Выводы

Таким образом, применение спутниковых данных среднего разрешения Sentinel-2 в зоне смешанных лесов позволяет с достаточно высокой точностью определять величину относительной полноты древостоев, т.е. осуществлять автоматизированное выявление низкополнотных (0,5–0,1) насаждений, пройденных выборочными санитарными рубками.

В ходе статистического анализа данных в среде RStudio получена экспоненциальная регрессионная модель. Значения коэффициентов корреляции и детерминации ($r = 0,787$;

$R^2 = 0,829$) свидетельствуют о сильной зависимости относительной полноты от показателя FCD.

Средняя точность модели, полученная методом перекрёстной проверки на натуральных данных, составляет 0,96 (при $p\text{-value} < 0,001$).

На основании установленной зависимости созданы попиксельные карты относительной полноты для лесных участков, пройденных выборочными рубками.

Согласно результатам исследования, среди насаждений, пройденных выборочными санитарными рубками, наибольшую площадь занимают древостои с полнотой 0,3 (42,9%).

Список использованных источников

1. Лесная таксация и лесоустройство / В.В. Загреев, Н.Н. Гусев, А.Г. Мошкалёв, Ш.А. Селимов. – М. : Экология, 1991. – 384 с.
2. Анучин, Н.П. Лесная таксация / Н.П. Анучин. – М. : Лесн. пром-сть, 1982. – 552 с.
3. Чандра, А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А.М. Чандра, С.К. Гош. – М. : Техносфера, 2008. – 312 с.
4. Литинский, П.Ю. Трёхмерное моделирование структуры и динамики таёжных ландшафтов / П.Ю. Литинский. – Петрозаводск : Карел. научн. центр РАН, 2007. – 113 с.
5. Rikimaru, A. Development of forest canopy density mapping and monitoring model using indices of vegetation, bare soil and shadow / A. Rikimaru, S. Miyatake // Proceeding of the 18th Asian conference on remote sensing. – Kuala Lumpur, Malaysia. – 20–24 October 1997. – P. 66–116.
6. Azizi, Z. Forest canopy density estimating using satellite images / Z. Azizi, A. Najafi, H. Sohrabi // The International Archives of the Photogrammetry. – 2008. – Vol. XXXVII.– P. 1127–1130.
7. Rikimaru, A. Tropical forest cover density mapping / A. Rikimaru, P.S. Roy, S. Miyatake // Tropical Ecology. – 2002. – 43(1). – P. 39–47.
8. Тихонов, А.С. Брянский лесной массив / А.С. Тихонов. – Брянск : Читай-город, 2001. – 312 с.
9. Тихонов, А.С. Брянское опытное лесничество: 1906–2006 / А.С. Тихонов. – Калуга : Гриф, 2006. – 280 с.
10. Combining UAV and Sentinel-2 auxiliary data for forest growing stock volume estimation through hierarchical model-based inference / S. Puliti, S. Saarela, T. Gobakken, G. Stahl, E. Naesset // Remote sensing of Environment. – 2018. – V. 204. – P. 485–497.
11. Assessment of environment, land management and spatial variables on recent changes in montado land cover in southern Portugal / S. Godinho, N. Guiomar, R. Machado, P. Santos, P. Sa-Sousa, J.P. Fernandes, N. Neves, T. Pinto-Correia // Agroforestry Systems.– 2016. – 90(1). – P. 177–192.
12. Abdollahnejad, A. Forest canopy density assessment using different approaches / A. Abdollahnejad, D. Panagiotidis, P. Surovy // Journal of forest science. – 2017. – 63(3). – P. 106–115.
13. Deka, J. Implementation of forest canopy density model to monitor tropical deforestation / J. Deka, O.P. Tripathi, M.L. Khan // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. – 2013. – 41(2). – P. 469–475.
14. Duong, T.L. Integration of GIS and remote sensing for evaluating forest canopy density index in Thai Nguyen Province, Vietnam / T.L. Duong, T.Y. Chou, Y.M. Fang // International journal of environmental science and development, 2017. – Vol. 8 (8). – P. 539–542.
15. Forest canopy density mapping using advance geospatial technique / K. Banerjee, S. Panda, J. Bandyopadhyay, M.K. Jain // International journal of innovative science, engineering and technology. – 2014. – 1(7). – P. 358–363.
16. Шошин, В.И. Выявление низкополотных насаждений после санитарно-оздоровительных мероприятий дистанционным зондированием в Брянском лесном массиве / В.И. Шошин, В.И. Дзубан, В.В. Вечеров // Лесотехнический журнал. – 2017. – Т. 7. – 2 (26). – С. 135–141.
17. Swain, P.H. Fundamentals of pattern recognition / P.H. Swain // Remote Sensing: the Quantitative Approach, 1978. – P. 136–187.
18. Mather, P.M. Computer processing of remote sensed images / P.M. Mather. – Chichester : Wiley, 1987. – 520 p.
19. Foody, G.M. The effect of training set size and composition on artificial neural network classification / G.M. Foody, M.B. McCulloch, W.B. Yates // International journal of remote sensing. – 1995. – Vol. 16(9). – P. 1707–1723.

References

1. Lesnaya taksaciya i lesoustrojstvo / V.V. Zagreev, N.N. Gusev, A.G. Moshkalyov, Sh.A. Selimov. – M. : Ekologiya, 1991. – 384 s.
2. Anuchin, N.P. Lesnaya taksaciya / N.P. Anuchin. – M. : Lesn. prom-st', 1982. – 552 s.
3. Chandra, A.M. Distancionnoe zondirovanie i geograficheskie informacionnye sistemy / A.M. Chandra, S.K. Gosh. – M. : Tekhnosfera, 2008. – 312 s.
4. Litinskij, P.Yu. Tryohmernoe modelirovanie struktury i dinamiki tayozhnyh landshaftov / P.Yu. Litinskij. – Petrozavodsk : Karel. nauchn. centr RAN, 2007. – 113 s.
5. Rikimaru, A. Development of forest canopy density mapping and monitoring model using indices of vegetation, bare soil and shadow / A. Rikimaru, S. Miyatake // Proceeding of the 18th Asian conference on remote sensing. – Kuala Lumpur, Malaysia. – 20–24 October 1997. – P. 66–116.
6. Azizi, Z. Forest canopy density estimating using satellite images / Z. Azizi, A. Najafi, H. Sohrabi // The International Archives of the Photogrammetry. – 2008. – Vol. XXXVII. – P. 1127–1130.
7. Rikimaru, A. Tropical forest cover density mapping / A. Rikimaru, P.S. Roy, S. Miyatake // Tropical Ecology. – 2002. – 43(1). – P. 39–47.
8. Tihonov, A.S. Bryanskij lesnoj massiv / A.S. Tihonov. – Bryansk : Chitaj-gorod, 2001. – 312 s.
9. Tihonov, A.S. Bryanskoe opytное lesnichestvo: 1906–2006 / A.S. Tihonov. – Kaluga : Grif, 2006. – 280 s.
10. Combining UAV and Sentinel-2 auxiliary data for forest growing stock volume estimation through hierarchical model-based inference / S. Puliti, S. Saarela, T. Gobakken, G. Stahl, E. Naeset // Remote sensing of Environment. – 2018. – V. 204. – P. 485–497.
11. Assessment of environment, land management and spatial variables on recent changes in montado land cover in southern Portugal / S. Godinho, N. Guiomar, R. Machado, P. Santos, P. Sa-Sousa, J.P. Fernandes, N. Neves, T. Pinto-Correia // Agroforestry Systems. – 2016. – 90(1). – P. 177–192.
12. Abdollahnejad, A. Forest canopy density assessment using different approaches / A. Abdollahnejad, D. Panagiotidis, P. Surovy // Journal of forest science. – 2017. – 63(3). – P. 106–115.
13. Deka, J. Implementation of forest canopy density model to monitor tropical deforestation / J. Deka, O.P. Tripathi, M.L. Khan // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. – 2013. – 41(2). – P. 469–475.
14. Duong, T.L. Integration of GIS and remote sensing for evaluating forest canopy density index in Thai Nguyen Province, Vietnam / T.L. Duong, T.Y. Chou, Y.M. Fang // International journal of environmental science and development, 2017. – Vol. 8 (8). – P. 539–542.
15. Forest canopy density mapping using advance geospatial technique / K. Banerjee, S. Panda, J. Bandyopadhyay, M.K. Jain // International journal of innovative science, engineering and technology. – 2014. – 1(7). – P. 358–363.
16. Shoshin, V.I. Vyyavlenie nizkopolnotnyh nasazhdenij posle sanitarno-ozdorovitel'nyh meropriyatij distancionnym zondirovaniem v Bryanskom lesnom massive / V.I. Shoshin, V.I. Dzuban, V.V. Veчерov // Lesotekhnicheskij zhurnal. – 2017. – T. 7. – 2 (26). – S. 135–141.
17. Swain, P.H. Fundamentals of pattern recognition / P.H. Swain // Remote Sensing: the Quantitative Approach, 1978. – R. 136–187.
18. Mather, P.M. Computer processing of remote sensed images / P.M. Mather. – Chichester : Wiley, 1987. – 520 p.
19. Foody, G.M. The effect of training set size and composition on artificial neural network classification / G.M. Foody, M.B. McCulloch, W.B. Yates // International journal of remote sensing. – 1995. – Vol. 16(9). – P. 1707–1723.

Automated Identification of Low-Density Stands of a Mixed Forest Area with Use of Medium Resolution Satellite Data on the Example of Uchebno-Opytnyj Leschoz BSUET

V. Vecherov

“Zaplesproekt”, Branch of FSBI “Roslesinforg”, Lead Engineer, Candidate of Agricultural Sciences, Bryansk, Russian Federation, vecherovv32@gmail.com

V. Dzuban

Forest Management in the Bryansk region, Head of Department, Bryansk, Russian Federation, dzu-vladimir@mail.ru

Yu. Perepechina

Bryansk State University of Engineering and Technology, Professors of the Forestry Department, Doctor of Agricultural Sciences, Bryansk, Russian Federation, lhf_bryansk@mail.ru

V. Shoshin

Bryansk State University of Engineering and Technology, Candidate of Agricultural Sciences, Bryansk, Russian Federation, VISHoshin44@gmail.com

Keywords: *Earth remote sensing, low-density plantings, vegetation index, forest canopy density, QGIS*

Relatively stand density is one of the most important taxation indicators, which allows determining the stock of stands and characterizing its condition. The relatively stand density of a forest as a characteristic of the actual productivity of a particular plantation.

Terrestrial and statistical methods in their practical application require laborious calculations and significant costs. That is why at present, modern and affordable methods of remote sensing have acquired special significance for monitoring the state of the lands of the forest fund.

The paper analyzes the possibility of automated detection of low-density stands, passed through selective sanitary felling, according to the index of forest canopy closure (FCD) based on the average spatial resolution of Sentinel-2. The FCD indicator is a convenient indicator to use for assessing the closeness of woody vegetation and the state of forests when using satellite imagery data. The advantage of this method lies in the possibility of modeling the density of crowns (closeness) without ground training data.

After a regression analysis of ground data and data obtained from forest canopy closure maps, a strong exponential dependence ($r = 0.787$, $R^2 = 0.829$ with p -value < 0.001) between the FCD and the relative fullness of the stand was revealed. Because of the established dependence, maps of relative completeness were created for forest plots covered by selective sanitary felling.