

УДК 630*58:528.88

ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕТРИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОВ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И ВЫБОРОЧНЫХ ЛЕСОТАКСАЦИОННЫХ ДАННЫХ¹

© 2021 г. Е. А. Гаврилюк^а, *, Н. В. Королева^а, Д. А. Карпухина^а, Е. Н. Соколова^а, Д. В. Ершов^а^аФГБУН Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН), ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, Москва, 117997 Россия

*E-mail: egor@ifi.rssi.ru

Поступила в редакцию 31.03.2021 г.

После доработки 14.05.2021 г.

Принята к публикации 21.07.2021 г.

Исследованы возможности геопространственного моделирования биометрических (возраст, высота, диаметр ствола, запас) и структурных (соотношение хвойных и лиственных пород по запасу) характеристик древостоев на основе разносезонных спутниковых изображений Landsat и выборочных лесоустроительных материалов в масштабах отдельно взятого региона России – Брянской области. Опорная выборка для обучения моделей и контроля результатов была сформирована на основе таксационных описаний для примерно 10000 геопривязанных лесоустроительных выделов общей площадью около 35 тыс. га. Используемые спутниковые данные были синхронизированы по времени с периодом проведения таксационных работ (2002–2005 гг.). Основные этапы геопространственного моделирования, включая формирование серии разносезонных композитных изображений, расчет спектральных признаков и извлечение их значений в местах расположения эталонных выделов, обучение регрессионных моделей методом случайных лесов и применение их на всей территории исследования, выполнялись на базе облачной платформы Google Earth Engine. Наилучшие результаты были получены для показателей соотношения хвойных и лиственных пород по запасу – коэффициент детерминации моделей $R^2 = 0.7$ при относительной ошибке RMSE = 22%. Для биометрических характеристик значения R^2 варьировали от 0.4 для возраста до 0.5 для запаса, а величина RMSE находилась в пределах 26–37%. Такой уровень точности в полной мере согласуется с результатами похожих зарубежных и российских исследований. Полученные тематические продукты продемонстрировали высокую сходимость с данными официальной статистики при агрегации в границах лесничеств региона: квадрат корреляции $r^2 = 0.98$ при относительном отклонении MD = 5% для покрытой лесом площади и $r^2 = 0.96$ при MD = 8.6% для суммарного запаса. В итоге описанное в работе сочетание исходных данных и методики их обработки позволяет получать достоверные оценки биометрических и структурных характеристик лесов, как минимум на уровне субъектов Российской Федерации.

Ключевые слова: возраст древостоев, высота древостоев, диаметр ствола, запас стволовой древесины, соотношение хвойных и лиственных пород, данные ДЗЗ, Landsat, случайные леса, Google Earth Engine.

DOI: 10.31857/S002411482106005X

Геопространственная информация о породно-возрастной структуре и основных биометрических показателях древостоев является необходимым элементом исходных данных как для задач оценки ресурсного потенциала, биоразнообразия и экосистемных функций лесов (Bagredo et al.,

2015; Brockerhoff et al., 2017; Лукина и др., 2020), так и для прогнозного моделирования их естественного или управляемого развития (Komarov et al., 2003; Landsberg, 2003; Чумаченко и др., 2007). В России источником таких данных традиционно служат выделенные планы лесонасаждений, дополненные таксационными описаниями, которые формируются в результате периодических лесоустроительных работ. Актуальность, достоверность и детальность материалов лесоустройства сильно разнятся по территории страны и в по-

¹ Исследование выполнено в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН АААА-А18-118052590019-7 (тематическая обработка данных) при финансовой поддержке Российского научного фонда (19-77-30015, подготовка исходных данных и написание программных скриптов).

следние годы подвергаются обоснованной критике (Гиряев, 2017; Отчет ..., 2020; Соколов, 2021). Однако стоит признать, что в текущий момент времени это наиболее распространенный и детальный тип данных, отражающих пространственное распределение качественных и количественных характеристик лесов для территории России.

С другой стороны, в качестве источника геопространственной информации о лесах могут быть использованы данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) различного типа и детальности (Lechner et al., 2020), которые с каждым годом становятся все более массовыми и доступными. Множество научных работ посвящено оценкам различных структурных и биометрических характеристик лесного покрова на основе спутниковых данных (Fagan, DeFries, 2009; Барталев и др., 2016; White et al., 2016). Наибольшее распространение для задач подобного типа получили оптические мультиспектральные изображения среднего и высокого пространственного разрешения с аппаратов Terra (NASA Terra MODIS, 2021), Landsat (USGS Landsat Missions, 2021) и Sentinel-2 (ESA Sentinel-2, 2021), что обусловлено их открытостью, глобальным охватом и отработанной методологией тематической обработки. Оптические изображения обладают высоким потенциалом (точность 80–90% и более) для определения границ лесного покрова (Gómez et al., 2016) и его породной структуры (Fassnacht et al., 2016). Однако оценки возраста и биометрических показателей (высота, диаметр ствола, запас, биомасса) на их основе, как правило, куда менее надежны: к примеру, характерные величины относительных ошибок определения запаса, согласно Н. Astola с соавт. (2019) находятся на уровне 48–56%. Тем не менее, вследствие ограниченного распространения высокодетальных оптических, специализированных радарных и лидарных данных, которые потенциально позволяют определять структурные и биометрические характеристики древостоев с более высокой точностью (Yu et al., 2015), оптические изображения разрешением 10–60 м являются на данный момент хоть и не лучшим, но наиболее доступным (а для территорий большого пространственного охвата часто и безальтернативным) источником спутниковой информации о лесах.

Методически оценка свойств лесов по спутниковым данным с пространственным разрешением хуже 1 м, как правило, представляет собой геопространственное моделирование (Shit et al., 2021). На основе ограниченной обучающей выборки из наземных объектов с известными характеристиками и расположением (пробных площадей или их аналогов) восстанавливаются статистические взаимосвязи между анализируемыми показателями и локальными свойствами пиксе-

лей, после чего полученная модель применяется ко всему изображению. С появлением в последние годы облачных платформ, обладающих специализированным инструментарием для хранения и потоковой обработки больших объемов геопространственных данных, таких как Google Earth Engine (GEE, Gorelick et al., 2017), Amazon Web Services (Shao et al., 2012) и др., получение тематических продуктов в масштабах крупных регионов, отдельных стран и всего мира в целом максимально упростилось (Kumar, Mutanga, 2018). Однако ключевым моментом является аккумуляция обучающей выборки достаточного объема и оптимального расположения для статистически надежного описания всего разнообразия моделируемых показателей территории. Во многих развитых странах существуют системы Национальной инвентаризации лесов и соответствующие сети пробных площадей, данные с которых используются при геопространственном моделировании параметров древостоев (Brososfske et al., 2014) в том числе и для территорий большого пространственного охвата, с использованием данных ДЗЗ (Matasci et al., 2018; Sanchez-Ruiz et al., 2019). В России первый цикл Государственной инвентаризации лесов (ГИЛ) завершился в 2020 г., и на данный момент информация с пробных площадей отсутствует в открытом доступе. Единственным функциональным аналогом, сопоставимым по пространственному охвату и набору показателей, являются лесоустроительные таксационные материалы.

В целом использование выборочных лесоустроительных данных в сочетании со спутниковыми изображениями — довольно распространенная практика в локальных исследованиях на территории России при оценке породной (Гаврилюк и др., 2018; Денисова и др., 2019) и возрастной (Данилова и др., 2017) структуры, а также отдельных биометрических (Сочилова, Ершов, 2012; Сочилова и др., 2018а) и производных от них показателей древостоев (Курбанов и др., 2013; Сочилова и др., 2018б). Однако нам не известны работы, в которых бы применялась универсальная методика геопространственного моделирования для одновременной оценки нескольких структурных и биометрических характеристик древостоев в региональном масштабе на основе разносезонных данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения и материалов лесоустройства в формате выделенной таксации. Поэтому целью настоящего исследования является оценка возможностей такого моделирования для показателей среднего возраста, высоты, диаметра ствола и запаса древесины на корню, а также соотношения по запасу хвойных и лиственных пород в насаждениях на примере лесов Брянской области.

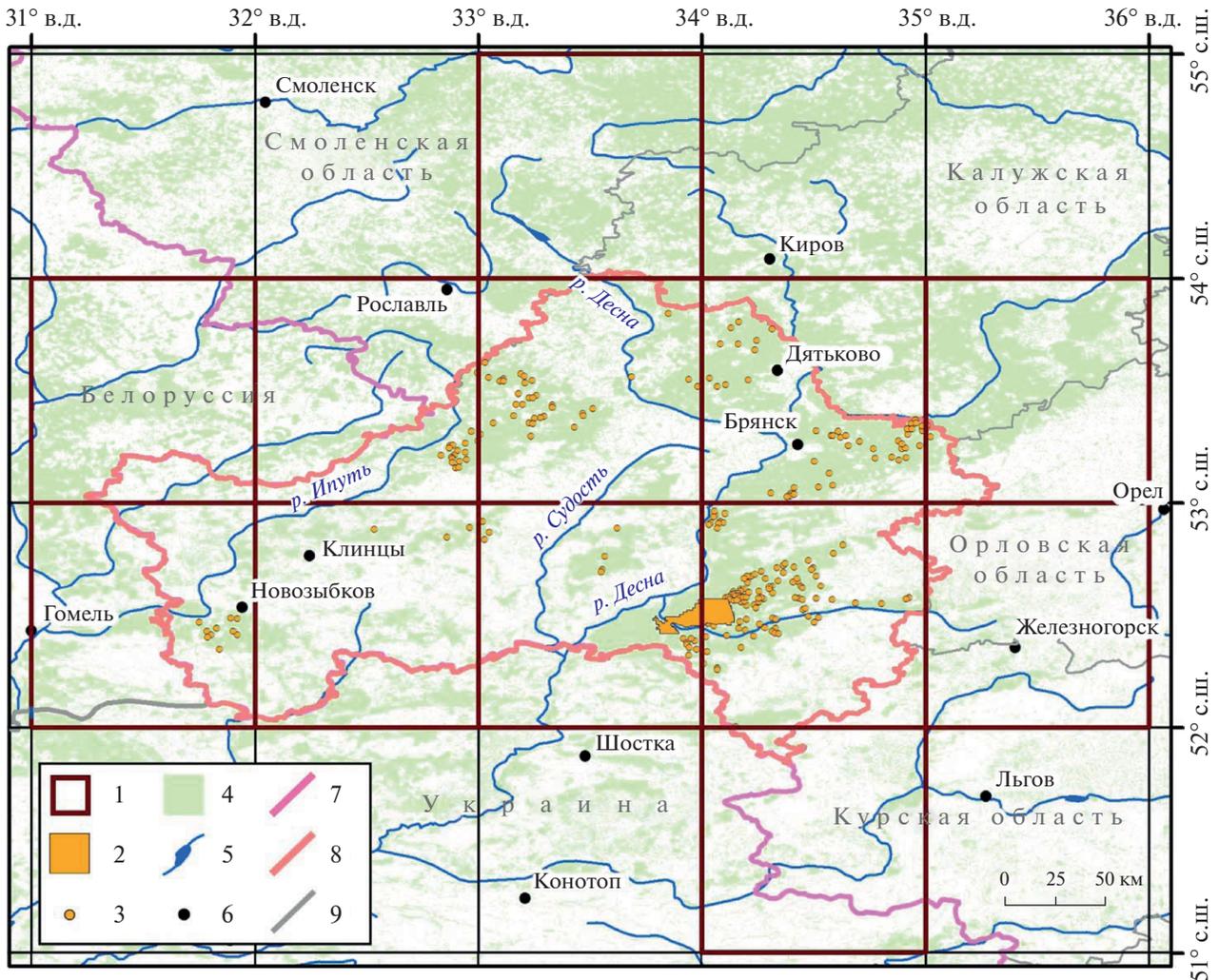


Рис. 1. Территория исследования. 1 – границы градусных ячеек, для которых проводилось геопространственное моделирование; 2 – территория заповедника “Брянский лес” и его охранный зоны; 3 – центры оцифрованных лесоустроительных кварталов за пределами заповедника “Брянский лес”; 4 – лесной покров с сомкнутостью не менее 30% на 2000 г. (по данным Global Forest Change); 5 – реки и водоемы; 6 – населенные пункты; 7 – граница Российской Федерации; 8 – граница Брянской области; 9 – прочие государственные и административные границы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследование проводилось для территории Брянской области (рис. 1). По геоботаническому районированию регион относится к южной полосе широколиственных лесов Европейской широколиственной области Восточноевропейской провинции и лежит на стыке двух подпровинций: Полесской, с господством дубово-сосновых лесов с грабом, и Среднерусской, с преобладанием сосново-дубовых лесов (Растительность ..., 1980). Леса на территории области распространены неравномерно, наиболее крупные массивы тянутся полосой по левобережью р. Десны, несколько меньшие – вдоль рр. Судости и Ипути. По данным официальной статистики (БГД – Регионы России, 2020) в XXI в. лесистость региона практически не менялась и остается на уровне около 33%, а общая площадь лесов составляет 1146 тыс. га с об-

щим запасом 221.6 млн м³ на конец 2019 г. Из них примерно 48% площади занимают хвойные насаждения. В породной структуре лесов выделяются сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*, 38% по площади), различные виды березы (*Betula pendula*, *B. pubescens*, 29%), ель обыкновенная (*Picea abies*, 10%), осина обыкновенная (*Populus tremula*, 9%), ольха черная (*Alnus glutinosa*, 7%) и дуб черешчатый (*Quercus robur*, 6%); в возрастной структуре преобладают средневозрастные насаждения (49%), затем идут молодняки (20%), приспевающие (18%), спелые и перестойные древостои (13%) (Открытые данные ..., 2021).

В качестве исходной информации о лесах территории использовались преобразованные и включенные в единую базу данных текстовые таксационные описания для государственного природного биосферного заповедника “Брян-

ский лес” и 87 участковых лесничеств области, полученные в результате лесоустроительных работ 2002–2005 гг. Эти материалы охватывают 199565 выделов в 8685 кварталах в пределах лесного фонда на площади 693429 га (60% от всех лесов области). Из общего объема лесоустроительной информации в работе использовались данные о 450 кварталах, содержащих около 10000 выделов с общей площадью 35 тыс. га. Примерно половина из этих кварталов приходится на территорию заповедника “Брянский лес” (включая его охранную зону), для которой электронные лесоустроительные материалы были предоставлены администрацией. Остальные кварталы, нерегулярно распределенные по территории Брянской области (рис. 1), были вручную оцифрованы и “привязаны” к географической системе координат авторами статьи.

Кварталы для оцифровки подбирались таким образом, чтобы максимально полно охватить вариабельность моделируемых характеристик на уровне выделов. Биометрические показатели древостоев в общем случае зависят от возраста, бонитета и полноты насаждения, а доли хвойных и лиственных пород по запасу отражены в формуле породного состава. Поэтому на основе имеющихся таксационных описаний все лесоустроительные выделы площадью более 1 га за пределами заповедника “Брянский лес” были стратифицированы на комплексные тематические группы с уникальными сочетаниями дискретных значений четырех показателей: класса возраста (10 классов от 1 до 10), бонитета (5 классов с I по V), относительной полноты (4 класса от 0.3 до 1.0 через 0.2 единицы) и доли хвойных пород в формуле породного состава (6 классов от 0 до 10 через 2 единицы). Затем для каждого квартала было оценено число N представленных в нем тематических групп. Далее для каждой тематической группы общей площадью более 100 га среди всех кварталов, в которых она была представлена хотя бы одним выделом, выбирался один квартал с максимальным числом N . Среди нескольких кварталов с одинаковым N предпочтение отдавалось кварталам с наименьшим общим числом выделов. В границах отобранных таким образом кварталов производилась сплошная оцифровка контуров выделов по растровым планам лесонасаждений участковых лесничеств. Такой подход позволил обеспечить охват наиболее распространенных по территории области тематических групп в нескольких повторностях при минимальном объеме и максимальной локализации работ по оцифровке.

Для соблюдения временного соответствия с лесоустроительными материалами в качестве исходных данных для геопространственного моделирования были использованы все доступные для территории исследования оптические мультиспектральные спутниковые изображения с аппа-

рата Landsat 7 с сенсором ETM+ (USGS Landsat 7, 2021) за период с 1999 по 2003 г. Сцены Landsat 7 содержат семь спектральных каналов видимого, а также ближнего, коротковолнового и теплового инфракрасного диапазонов пространственным разрешением 30 м (60 м для теплового канала), а также один панхроматический канал разрешением 15 м. В работе использовались только сцены первого раздела первой коллекции Landsat (Collection 1 Tier 1) (Wulder et al., 2019), прошедшие стандартные процедуры предварительной обработки и преобразованные в значения спектральной яркости на уровне подстилающей поверхности (Masek et al., 2006).

Для разграничения территорий, покрытых и непокрытых лесной растительностью, при тематической обработке спутниковых изображений и анализе результатов моделирования использовались геопространственные данные проекта Global Forest Change (GFC) (Hansen et al., 2013). Маска лесов была сформирована из продукта сомкнутости лесного покрова по состоянию на 2000 г. с внесением ежегодных изменений (нарушений) до 2003 г. включительно. К лесным относились не подвергавшиеся изменениям пиксели с исходными значениями сомкнутости 30% и более.

Основные этапы геопространственного моделирования выполнялись на базе ГЕЕ и включали в себя: (1) формирование серии разносезонных спутниковых композитных изображений (композитов); (2) преобразование исходных значений пикселей в каналах композитов в производные спектральные признаки; (3) извлечение значений признаков в местах расположения эталонных выделов с известными характеристиками лесов; (4) обучение регрессионной модели по извлеченным признакам; (5) применение обученной модели ко всем пикселям композитов. Сопутствующие процессы для оценки эффективности и статистической значимости обученных моделей, информативности использованных признаков и точности результатов моделирования выполнялись локально в программной среде R версии 4.0.2 (R Core Team, 2020). Для оптимизации производительности обработка геопространственных данных проводилась последовательно по регулярной сети ячеек размером $1^\circ \times 1^\circ$ (примерно 70×110 км), двенадцать из которых полностью или частично находятся в границах Брянской области (рис. 1).

На основе исходных сцен Landsat 7 для каждой ячейки сети было сформировано шесть безоблачных разносезонных композитов, соответствующих последовательным периодам фенологического цикла зеленой растительности (табл. 1). Временные границы периодов определялись по данным MODIS о динамике наземного покрова (MCD12Q2) версии 6 (Friedl et al., 2019).

Таблица 1. Продолжительность фенологических периодов и среднее число безоблачных измерений на пиксель при формировании композитных изображений Landsat (сводная статистика по всем градусным ячейкам)

| Период | Начало периода, номер дня в году | | | Окончание периода, номер дня в году | | | Продолжительность периода, дней | | | Число безоблачных измерений на пиксель | | |
|---------|-------------------------------------|------|-------|--|------|-------|------------------------------------|------|-------|---|------|-------|
| | мин. | мед. | макс. | мин. | мед. | макс. | мин. | мед. | макс. | мин. | мед. | макс. |
| Зима | 45 | 45 | 45 | 94 | 99 | 101 | 49 | 54 | 56 | 2 | 5 | 9 |
| Весна 1 | 95 | 99 | 102 | 126 | 129 | 131 | 29 | 30 | 33 | 3 | 8 | 11 |
| Весна 2 | 127 | 129 | 132 | 156 | 157 | 159 | 27 | 29 | 30 | 1 | 4 | 8 |
| Лето | 157 | 157 | 160 | 199 | 208 | 211 | 43 | 51 | 54 | 4 | 8 | 11 |
| Осень 1 | 200 | 208 | 212 | 237 | 262 | 268 | 38 | 52 | 58 | 6 | 11 | 15 |
| Осень 2 | 238 | 262 | 269 | 296 | 301 | 309 | 38 | 41 | 59 | 2 | 7 | 10 |

Примечание. Мин. – минимум, мед. – медиана, макс. – максимум. Цифрами в названии периодов обозначены первая (1) и вторая (2) части традиционных сезонов года

MCD12Q2 – это набор ежегодных (с 2000 по 2017 г.) глобальных тематических изображений с пространственным разрешением 500 м, которые содержат информацию о семи ключевых датах (представленных как номера дней в году) в динамике хода кривой спектрального вегетационного индекса EVI2 (Jiang et al., 2008). Ключевые даты соответствуют началу и середине роста, выходу на плато, пику, началу, середине и окончанию убывания значений индекса и, таким образом, косвенно отражают смену фенологических фаз. В работе использовались шесть ключевых дат (все, кроме пика) для разграничения шести периодов года: снежная зима, первая и вторая половина весны, лето, первая и вторая половина осени. Для каждой ячейки фиксированные границы периодов определялись следующим образом: сначала попиксельно вычислялись межгодовые медианные значения ключевых дат по изображениям MCD12Q2 за 2000–2003 гг., после чего рассчитывались медианные значения по всем пикселям в пределах ячейки. Начало зимы для всех ячеек было зафиксировано на середине февраля (45-й день года), чтобы исключить влияние слабой освещенности при съемке в первые зимние месяцы.

После определения границ временных периодов процесс формирования разносезонных композитов в GEE сводится к простой последовательности полностью автоматизированных операций (Stuhler et al., 2016): (1) фильтрация выбранной коллекции спутниковых данных (в нашем случае – Landsat 7) по границам области интереса (ячейки градусной сети), временному периоду и формальным свойствам, которые содержатся в атрибутах изображений (облачность меньше 50%); (2) маскирование облачных, затененных и дефектных пикселей для каждого из оставшихся изображений в коллекции (сцены Landsat укомплектованы тематическими масками качества пикселей); (3) статистическая агрегация валидных измерений в единый композит (использовались медианные значения).

В качестве спектральных признаков (переменных) для последующего моделирования использовались исходные значения спектральной яркости в зеленом (2-й канал по порядку, рабочий диапазон длин волн 519–601 нм), красном (3, 631–692 нм), ближнем инфракрасном (4, 772–898 нм), первом (5, 1547–1748 нм) и втором (7, 2065–2346 нм) коротковолновом инфракрасном каналах полученных композитов, а также их попарные нормализованные отношения. Нормализованные отношения каналов (Crippen, 1990) являются обобщенными функциональными аналогами широко распространенных вегетационных индексов, таких как NDVI или SWVI, и рассчитываются по формуле:

$$NR_{i+n,i} = \frac{B_{i+n}}{B_i + B_{i+n}},$$

где $NR_{i+n,i}$ – значение нормализованного отношения канала с порядковым номером $i+n$ к каналу с порядковым номером i ; B_i – значение пикселя в канале изображения с порядковым номером i ; B_{i+n} – значение пикселя в канале изображения с порядковым номером $i+n$; i – целое число в пределах от 1 до $N-1$; n – целое число в пределах от 1 до $N-i$; N – общее число каналов в изображении. В нашем случае при использовании пяти спектральных каналов можно получить 10 таких отношений. Всего, таким образом, на основе шести разносезонных композитов было получено 90 геопространственных переменных (30 исходных каналов и 60 нормализованных отношений).

Отбор оцифрованных выделов в эталонную выборку проводился по критериям площади (не менее 1 га), ярусности (наличие только 1-го яруса), показателям среднего возраста (от 10 лет), высоты (от 5 м) и диаметра ствола (от 4 см), а также по однородности в контексте спектральных характеристик. В качестве меры однородности использовался коэффициент вариации (Brown, 1998), который рассчитывался для каждого выдела по значениям спектральной яркости в каналах

сформированных разносезонных композитов. Выделы хотя бы с одним значением коэффициента вариации больше 30% отсеивались. В результате в итоговую эталонную выборку вошло 6137 выделов, которые затем были разбиты на обучающую и контрольную подвыборки в соотношении 3 : 1. Для разбиения применялся метод стратифицированного случайного отбора, с использованием в качестве страт описанных выше комплексных тематических групп. В качестве обучающих и контрольных значений моделируемых биометрических показателей среднего возраста, высоты и диаметра ствола рассматривались значения для главной породы выдела, для запаса – интегральное значение по всем породам (в $\text{м}^3 \text{га}^{-1}$). Доли хвойных и лиственных пород по запасу оценивались согласно формуле породного состава и переводились в шкалу от 0 до 100%. Очевидно, что доли хвойных и лиственных пород – это взаимообратные величины, однако для удобства и полноты представления результатов в работе они рассматриваются как два независимых показателя.

Для сопоставления со значениями моделируемых характеристик лесов использовались средние значения геопространственных переменных, рассчитанные в пределах эталонных выделов. В расчете участвовали только пиксели, центры которых попадали в границы выдела, без учета площади их пересечения. Также на растры спектральных признаков предварительно накладывалась маска лесов по данным GFC, чтобы исключить из расчетов нелесные пиксели.

На основе значений переменных, осреднённых в пределах выделов, проводился корреляционный анализ с целью оптимизации исходного набора спектральных признаков. Для всех переменных оценивалась попарная корреляция Пирсона (r), после чего из пар со значением $r > 0.95$ отбрасывались переменные с более высоким средним значением r , рассчитанным для каждой переменной по всем ее парам. Таким образом, исходный набор разносезонных спектральных признаков был сокращен до 66. К ним также были добавлены две переменные, отражающие пространственное положение выделов, – широта и долгота их центров, выраженные в десятичных градусах, – для учета в процессе моделирования локальных особенностей мест произрастания лесов, не отражающихся на спутниковых изображениях.

Поскольку все характеристики лесов, рассматриваемые в рамках данной работы, выражаются в непрерывных численных значениях, при геопространственном моделировании применялись модели регрессионного типа. Для их построения использовался метод случайных лесов (Breiman, 2001), а также сопутствующий ему комплекс функций для оценки информативности переменных и эффективности обучения. GEE включает в себя про-

граммную реализацию случайных лесов *Smile* (Li, 2014), для локальных расчетов использовалась реализация в программной среде R в пакете *ranger* (Wright, Ziegler, 2017). Для обучения регрессионных моделей использовался ансамбль из 500 деревьев, число случайных признаков при расщеплении дерева было зафиксировано на значении 34 (половина от общего числа), а минимальный размер узла был установлен на уровне 1 (т.е. деревья прорастивались полностью). В качестве результата прогнозирования модели использовалось простое осреднение предсказаний всех деревьев ансамбля.

Эффективность обучения полученных моделей оценивалась по стандартным статистическим метрикам – коэффициенту детерминации (R^2), средней абсолютной ошибке (MAE) и квадратному корню из средней квадратической ошибки (RMSE), а также относительным величинам MAE и RMSE – процентным значениям от среднего (AVG) и разброса (RNG) моделируемых показателей. Метрики оценивались на основе предсказаний для исходной обучающей выборки, полученных интегрированным в случайные леса методом out-of-bag (OOB, Breiman, 1996). Статистическую значимость моделей (p -значение) оценивалась на основе множественного пермутационного теста из 200 итераций для зависимой переменной (Altman et al., 2010). В качестве меры информативности переменных в процессе обучения использовался стандартный для случайных лесов показатель среднего уменьшения общей точности модели (MDA – Mean Decrease in Accuracy) после однократной пермутации оцениваемой независимой переменной. В случае регрессионного анализа MDA характеризует разницу между величиной средней квадратической ошибки модели до перестановки значений переменной и после нее. Для возможности прямого сопоставления информативности переменных при моделировании характеристик разного типа и размерности в работе использовались относительные показатели MDA (в %), получаемые путем нормирования всех исходных значений на величину максимального из них.

Для получения итоговых тематических продуктов к оптимизированному набору геопространственных данных на пиксельном уровне применялись соответствующие модели, после чего результаты – растровые изображения геопространственным разрешением 30 м – выгружались из GEE в облачное хранилище. По окончании последовательной обработки всех градусных ячеек эти изображения объединялись в единый растр, на который накладывалась маска лесного покрова по данным GFC, формируя таким образом финальные результаты моделирования.

Точность полученных тематических продуктов оценивалась по контрольной выборке из 1536

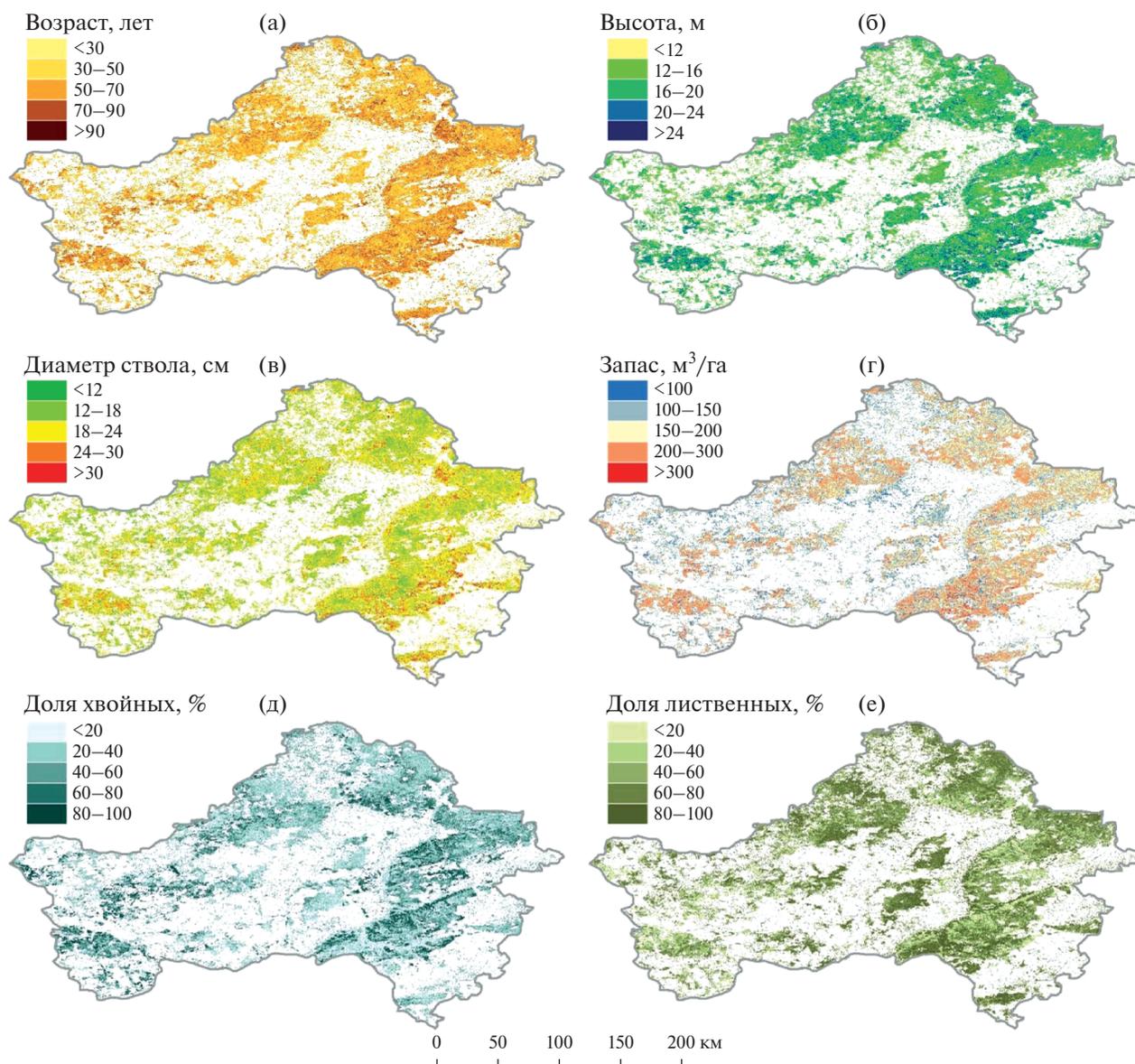


Рис. 2. Результаты геопространственного моделирования характеристик древостоев Брянской области. а – средний возраст; б – средняя высота; в – средний диаметр стволов; г – запас стволовой древесины; д – доля хвойных пород по запасу; е – доля лиственных пород по запасу.

выделов по тем же статистическим метрикам, что и эффективность обучения моделей. Попиксельные результаты моделирования осреднялись в границах выделов для сравнения с контрольными значениями анализируемых показателей по тем же принципам, что и при извлечении признаков для обучения. Кроме того, полученные тематические продукты запасов и доли хвойных пород, пересчитанные в суммарные значения запасов для 18 лесничеств и территории заповедника “Брянский лес”, сравнивались с официальными данными, содержащимися в Лесном плане Брянской области 2008 г. (Лесной план ..., 2008). В качестве количественных метрик для сравнения использовались квадрат корреляции Пирсона между абсо-

лютными значениями показателей (r^2) и относительное среднее отклонение (MD), рассчитанное аналогично показателю MAE для регрессионных моделей с нормировкой по среднему значению.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам работы были получены геопространственные тематические продукты решением 30 м, характеризующие средний возраст, высоту, диаметр ствола, запас и соотношение (по запасу) хвойных и лиственных пород в древостоях Брянской области по состоянию на 2003 год (рис. 2). Общая площадь лесов в границах региона, выделенная по данным GFC, соста-

Таблица 2. Описательная статистика распределения показателей для исходных таксационных данных и результатов геопространственного моделирования

| Показатель | Данные | Среднее | Стандартное отклонение | Мин. | 1-й квартиль | Медиана | 3-й квартиль | Макс. |
|--|--------|---------|------------------------|------|--------------|---------|--------------|-------|
| Возраст, лет | О | 53 | 25 | 10 | 35 | 50 | 70 | 170 |
| | К | 52 | 23 | 10 | 35 | 50 | 65 | 160 |
| | Т | 54 | 25 | 1 | 39 | 55 | 70 | 205 |
| | М | 57 | 12 | 1 | 48 | 57 | 65 | 119 |
| Высота, м | О | 19 | 7 | 5 | 14 | 20 | 24 | 35 |
| | К | 19 | 6 | 5 | 14 | 20 | 24 | 35 |
| | Т | 19 | 7 | 1 | 16 | 22 | 25 | 38 |
| | М | 17 | 3 | 1 | 15 | 17 | 20 | 29 |
| Диаметр ствола, см | О | 20 | 9 | 4 | 14 | 20 | 26 | 64 |
| | К | 20 | 9 | 4 | 14 | 20 | 26 | 60 |
| | Т | 21 | 9 | 2 | 16 | 22 | 28 | 96 |
| | М | 20 | 5 | 1 | 17 | 20 | 23 | 42 |
| Запас, м ³ га ⁻¹ | О | 189 | 98 | 10 | 110 | 180 | 260 | 530 |
| | К | 196 | 98 | 15 | 110 | 200 | 270 | 500 |
| | Т | 202 | 99 | 5 | 130 | 210 | 270 | 580 |
| | М | 169 | 55 | 1 | 125 | 167 | 209 | 393 |
| Доля хвойных, % | О | 35 | 36 | 0 | 1 | 20 | 70 | 100 |
| | К | 35 | 36 | 0 | 0 | 20 | 70 | 100 |
| | Т | 45 | 39 | 0 | 1 | 40 | 80 | 100 |
| | М | 41 | 22 | 1 | 24 | 37 | 54 | 99 |
| Доля лиственных, % | О | 65 | 36 | 0 | 30 | 80 | 100 | 100 |
| | К | 65 | 37 | 0 | 30 | 80 | 100 | 100 |
| | Т | 55 | 39 | 0 | 20 | 60 | 100 | 100 |
| | М | 59 | 22 | 1 | 47 | 64 | 76 | 100 |

Примечание. Мин. – минимум, макс. – максимум, О – обучающая выборка, К – контрольная выборка, Т – все исходные таксационные данные, М – результаты моделирования в границах Брянской области.

вила 1547 тыс. га, а суммарный запас, оцененный по результатам моделирования, – 261.7 млн м³, что значительно выше данных официальной статистики. Это естественная ситуация, поскольку публичная информация о лесных ресурсах в России, как правило, относится только к территории лесного фонда, а не ко всем территориям, покрытым древесной растительностью.

Средний возраст древостоев Брянской области по результатам моделирования составил 57 лет, средняя высота – 17 м, средний диаметр ствола – 20 см, средний запас – 169 м³ га⁻¹, соотношение хвойных и лиственных пород по запасу – 41 : 59. Остальные статистические характеристики распределения полученных показателей, в сравнении с исходными лесоустроительными материалами, приведены в табл. 2. Результаты моделирования довольно близки к таксационным данным в средних значениях (за исключением запаса, который ниже примерно на 16%), но при этом гораздо более однородны (стандартное отклонение

ниже примерно в два раза для всех показателей). Кроме того, прослеживается явная тенденция к недооценке высоких значений биометрических характеристик, а также переоценке доли лиственных древостоев по запасу, что подтверждается и результатами валидации.

Сводные показатели эффективности обучения моделей, а также результаты валидации тематических продуктов приводятся в табл. 3, а на рис. 3 представлены диаграммы рассеяния контрольных и предсказанных значений. Оценки, полученные при сравнении результатов моделирования с тестовым набором выделов, незначительно ниже оценок, полученных в процессе обучения на основе ООВ-метода. Все модели статистически значимы ($p < 0.005$). Наилучшие результаты наблюдаются при моделировании соотношения хвойных и лиственных пород по запасу – R^2 примерно 0.7 и RMSE около 22%. При этом характерная недооценка доли хвойных пород в запасе древостоев может быть связана с более компактной

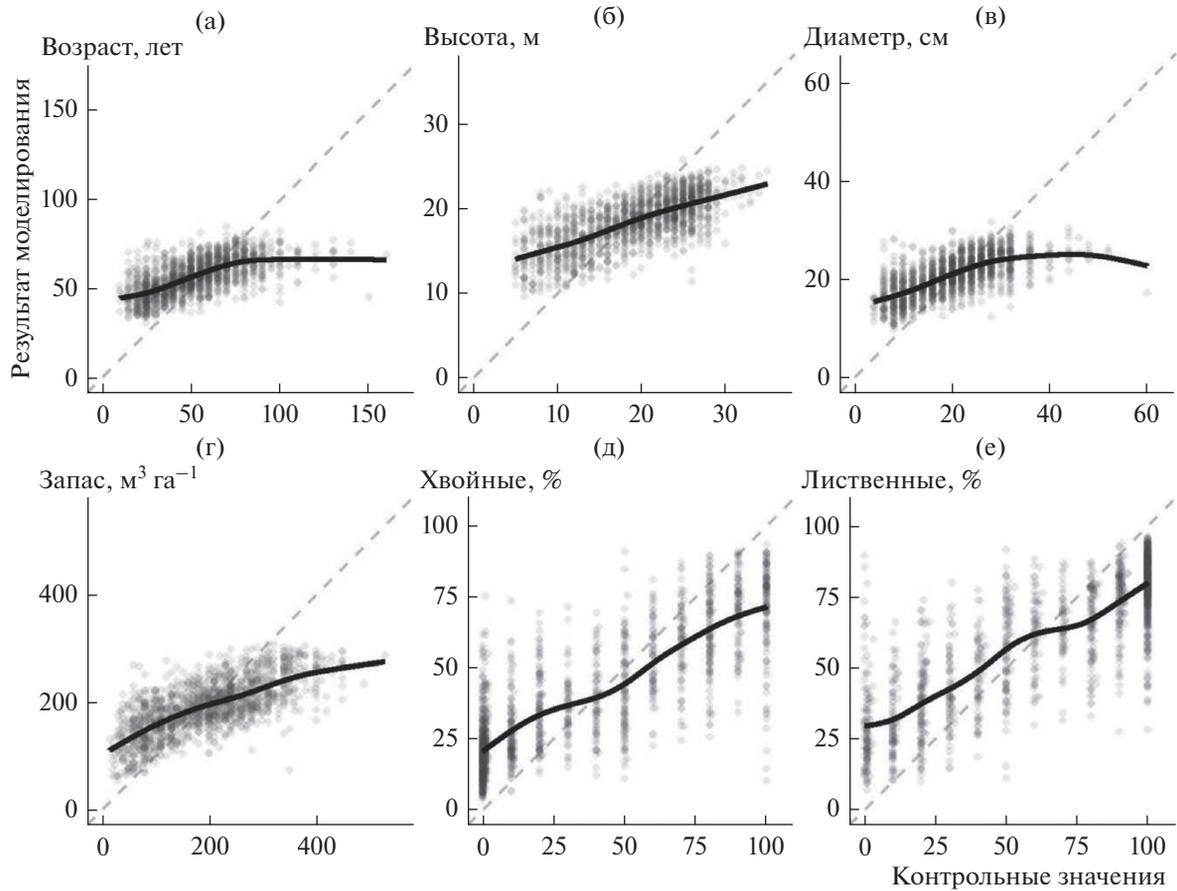


Рис. 3. Диаграммы рассеяния предсказанных и контрольных значений для характеристик древостоев Брянской области. а – средний возраст, лет; б – средняя высота, м; в – средний диаметр стволов, см; г – запас стволовой древесины, м³ га⁻¹; д – доля хвойных пород по запасу, %; е – доля лиственных пород по запасу, %.

формой кроны по сравнению с лиственными деревьями, что обуславливает их более низкий вклад в проективное покрытие полого, а, значит, и в значение спектральной яркости смешанного пикселя при одном и том же числе стволов.

Для биометрических характеристик уровень точности несколько ниже: R^2 изменяется от 0.4 для возраста до 0.5 для запаса, а $RMSE_{AVG}$ находится в пределах 26–37%. Тенденции к завышению низких и занижению высоких значений в

Таблица 3. Показатели эффективности регрессионных моделей при обучении (ООВ) и результаты валидации тематических продуктов (Тест)

| Показатель | Возраст, лет | | Высота, м | | Диаметр ствола, см | | Запас, м ³ га ⁻¹ | | Доля хвойных, % | | Доля лиственных, % | |
|-------------------------|--------------|------|-----------|------|--------------------|------|--|------|-----------------|------|--------------------|------|
| | ООВ | Тест | ООВ | Тест | ООВ | Тест | ООВ | Тест | ООВ | Тест | ООВ | Тест |
| R^2 | 0.39 | 0.39 | 0.53 | 0.48 | 0.46 | 0.43 | 0.55 | 0.50 | 0.66 | 0.68 | 0.66 | 0.69 |
| MAE | 14.0 | 15.0 | 3.6 | 4.0 | 4.8 | 5.2 | 52.2 | 58.2 | 15.4 | 18.5 | 15.3 | 18.2 |
| MAE _{RNG} , % | 8.7 | 10.0 | 11.8 | 13.3 | 8.0 | 9.3 | 10.6 | 11.3 | 15.4 | 18.5 | 15.3 | 18.2 |
| MAE _{AVG} , % | 26.2 | 28.8 | 18.9 | 21.0 | 24.1 | 26.0 | 27.7 | 29.7 | 42.5 | 52.3 | 23.8 | 28.0 |
| RMSE | 19.9 | 19.1 | 4.5 | 4.9 | 6.6 | 6.7 | 66.2 | 72.7 | 21.0 | 22.2 | 20.9 | 22.0 |
| RMSE _{RNG} , % | 12.4 | 12.7 | 15.1 | 16.3 | 11.0 | 12.0 | 13.5 | 14.1 | 21.0 | 22.2 | 20.9 | 22.0 |
| RMSE _{AVG} , % | 37.2 | 36.6 | 24.2 | 25.7 | 33.0 | 33.7 | 35.1 | 37.1 | 58.0 | 62.8 | 32.5 | 33.7 |

Примечание. R^2 – коэффициент детерминации модели (при валидации – квадрат корреляции контрольных и предсказанных значений); MAE – средняя абсолютная ошибка; RMSE – квадратный корень из средней квадратической ошибки; MAE_{RNG} и RMSE_{RNG} – относительные значения соответствующих ошибок, полученные посредством нормирования на величину разброса значений в выборке; MAE_{AVG} и RMSE_{AVG} – относительные значения соответствующих ошибок, полученные посредством нормирования на величину среднего значения по выборке.

Таблица 4. Результаты валидации тематических продуктов биометрических показателей древостоев для ограниченного диапазона значений

| Показатель | Возраст, 20–80 лет | Высота, 5–30 м | Диаметр ствола, 10–30 см | Запас, 50–400 м ³ га ⁻¹ |
|-------------------------|--------------------|----------------|--------------------------|---|
| R^2 | 0.40 | 0.47 | 0.38 | 0.46 |
| MAE | 13.4 | 3.9 | 3.8 | 54.7 |
| MAE _{RNG} , % | 16.7 | 15.8 | 19.1 | 15.6 |
| MAE _{AVG} , % | 25.8 | 20.8 | 19.2 | 27.6 |
| RMSE | 16.4 | 4.8 | 4.7 | 67.8 |
| RMSE _{RNG} , % | 20.5 | 19.2 | 23.7 | 19.4 |
| RMSE _{AVG} , % | 31.7 | 25.4 | 23.9 | 34.3 |

Примечание. Обозначения показателей см. табл. 4.

разной степени выражены для всех моделей биометрических показателей. Наиболее вероятной причиной является низкая чувствительность использованных переменных к вариабельности анализируемых характеристик древостоев по достижении ими определенных пороговых значений на обоих концах распределения, т.е. наблюдается эффект насыщения, хорошо известный для оптических спутниковых данных (Zhao et al., 2016). При оценке точности результатов моделирования для ограниченного диапазона значений (табл. 4) наблюдается заметное снижение RMSE для показателей возраста (на 14%) и диаметра ствола (на 29%). Для показателей высоты и запаса этот эффект выражен в значительно меньшей степени.

В целом полученные показатели эффективности хорошо согласуются с результатами похожих исследований. G. Matasci с соавт. (2018) при моделировании биометрических показателей лесов всей Канады на основе данных Landsat и лидарных трансект приводят оценки точности для высот на уровне $R^2 = 0.5$ при RMSE = 3.6 м (34%) и для запасов $R^2 = 0.5$ при RMSE = 72 м³ га⁻¹ (79%). Н. Astola с соавт. (2019) на территории Финляндии получили $R^2 = 0.51$ при RMSE = 37% для высот, $R^2 = 0.47$ при RMSE = 45% для диаметров ствола и $R^2 = 0.38$ при RMSE = 72% для запасов при оценке по данным Landsat и более точные результаты (RMSE на 6–13% ниже) по данным Sentinel-2. В. Жарко с соавт. (Zharko et al., 2020) приводят значения $R^2 = 0.61$ и RMSE = 67 м³ га⁻¹ при моделировании запасов на основе зимних изображений Sentinel-2 в Костромской области. С. Senf с соавт. (2020) при оценке многолетней динамики соотношения хвойных и лиственных пород в национальном парке “Баварский лес” получили R^2 около 0.6 при RMSE = 19–24% в зависимости от использованного сенсора Landsat. Для возраста древостоев даже при совместном использовании оптических изображений и материалов лазерного сканирования характерные ошибки моделирова-

ния находятся в диапазоне 10–20 лет (Schumacher et al., 2020). Таким образом, в аспекте точности наши результаты можно охарактеризовать как ожидаемые для описанного сочетания исходных данных и методов, при этом использование лесоустроительных выделов вместо наземных пробных площадей для обучения моделей никак не сказалось на показателях их эффективности.

Кроме того, результаты моделирования продемонстрировали высокую сходимость с официальными данными на уровне лесничеств (рис. 4). При сравнении площадей, занятых лесной растительностью в границах квартальной сети, значение r^2 составило 0.98 при величине MD = 5%. Для суммарных значений запасов аналогичные показатели составили 0.96 и 8.6% соответственно. Однако при сравнении суммарных запасов только хвойных насаждений при сопоставимом значении $r^2 = 0.92$ MD было заметно выше – 22.9%, что объясняется уже обозначенным характерным эффектом занижения доли хвойных пород древостоев при моделировании. Тем не менее высокая корреляция значений запасов свидетельствует о систематическом характере этого занижения, что оставляет возможности для статистического определения компенсирующих поправок.

В данной работе мы не ставили задачу детального исследования информативности геопространственных признаков, использованных для моделирования, однако формальные оценки значимости переменных были проведены (табл. 5). Для всех биометрических характеристик наилучшую информативность продемонстрировал второй коротковолновый канал (7 канал Landsat 7) первой части осени. Кроме того, для показателей возраста, высоты и диаметра ствола сопоставимую значимость показал ближний инфракрасный канал (4) первой части весны. Помимо этого, для высоты древостоев высокую информативность имели красные каналы (3) второй части весны и первой части осени. При моделировании долей хвойных и лиственных пород в запасе са-

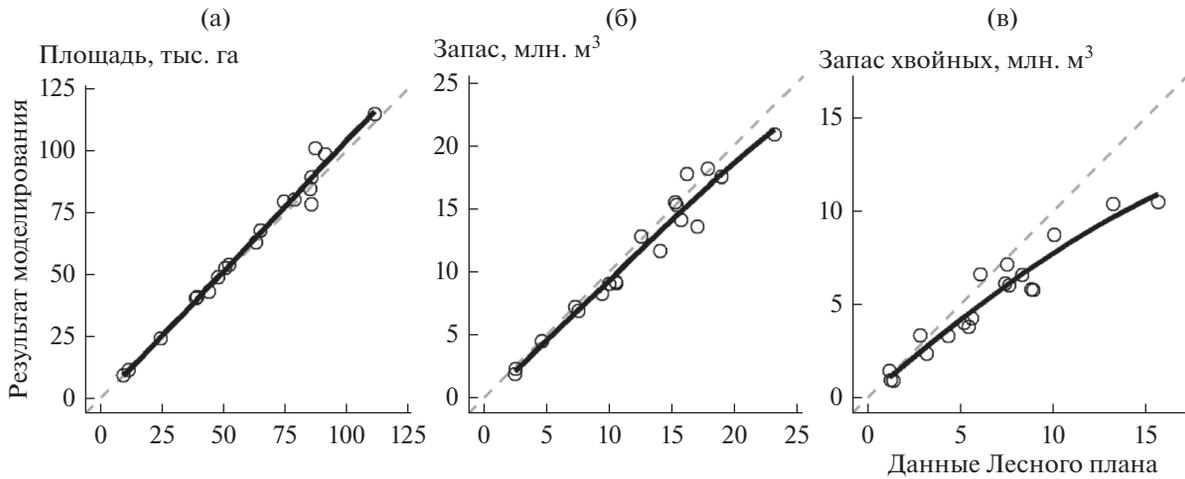


Рис. 4. Диаграммы рассеяния агрегированных на уровне лесничеств результатов геопространственного моделирования и официальных данных Лесного плана Брянской области 2008 г. а – покрытая лесом площадь, тыс. га; б – общий запас стволовой древесины, млн м³; в – общий запас стволовой древесины хвойных насаждений, млн м³.

мыми значимыми были ближний инфракрасный канал (4) лета, нормализованное отношение коротковолновых каналов (7/5) зимы и второй коротковолновой канал (7) второй части осени. Также стоит отметить, что все 68 использованных переменных имели положительную информативность при обучении моделей для всех шести характеристик древостоев (т.е. повышали их эффективность). Таким образом, для различных моделируемых показателей список наиболее значимых переменных довольно индивидуален, в контексте как типов спектральных признаков, так и их сезонности. Поэтому набор переменных, использованный в работе, в определенной степени является универсальным (но не исчерпывающим) для задач геопространственного моделиро-

вания различных биометрических и структурных характеристик лесного покрова.

Полученные результаты позволяют сделать положительные выводы о потенциале и работоспособности использованных исходных данных, инструментов и методики, однако полномасштабная реализация подобного подхода с целью получения геопространственных тематических продуктов для всей территории России на данный момент возможна только в отдаленной перспективе по причине нехватки наземной информации о лесах. Материалы лесоустройства для большей части страны неактуальны, и текущие объемы проводимых работ не позволяют компенсировать их устаревание. Кроме того, в большинстве случаев эти данные не доступны для широ-

Таблица 5. Относительные показатели MDA для десяти наиболее информативных геопространственных переменных при регрессионном моделировании

| Признак | Сезон | MDA, % | | | | | |
|---------|---------|---------|--------|----------------|-------|--------------|-----------------|
| | | возраст | высота | диаметр ствола | запас | доля хвойных | доля лиственных |
| K7* | Осень 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 9.8 | 9.6 |
| K4 | Лето | 30.4 | 45.0 | 29.5 | 23.3 | 100 | 100 |
| K4 | Весна 1 | 92.1 | 78.2 | 77.9 | 18.5 | 3.6 | 3.2 |
| K3 | Весна 2 | 13.3 | 82.7 | 27.7 | 17.8 | 2.3 | 2.4 |
| K7/K5 | Зима | 29.2 | 39.6 | 27.0 | 14.5 | 73.1 | 72.0 |
| K7 | Осень 2 | 21.4 | 7.1 | 13.1 | 5.6 | 63.8 | 68.5 |
| K3 | Осень 1 | 16.8 | 62.2 | 45.4 | 35.6 | 2.8 | 2.9 |
| K3/K2 | Зима | 57.3 | 18.0 | 38.8 | 21.6 | 15.1 | 14.9 |
| K5/K4 | Лето | 49.8 | 41.9 | 50.1 | 17.5 | 3.8 | 4.0 |
| K3/K2 | Весна 2 | 17.2 | 43.3 | 22.0 | 21.0 | 4.7 | 5.1 |

*Номер канала Landsat 7.

кой научной общественности или распространяются на коммерческой основе. Результаты наземных обследований, проводившихся в рамках первого цикла ГИЛ, все еще находятся в обработке, и сроки их открытого опубликования неизвестны. Наземные пробные площади, закладываемые в рамках научных работ, хотя и довольно многочисленны, как правило, очень неоднородны в своем пространственном расположении, периодичности проводимых измерений, а также составе определяемых на них показателей. Особенно стоит отметить, что именно расположение пробных площадей (или их аналогов) оказывает наибольшее влияние на достоверность геопространственного моделирования, поэтому планирование наземных обследований и размещение тестовых участков должно проводиться с учетом результатов предварительной тематической обработки спутниковых данных (автоматическая сегментация, кластерный анализ), которые затем будут использованы при моделировании. Иначе даже выборка из сотен наземных измерений может оказаться недостаточно представительной, например, если пробные площади массово размещаются в переходных зонах между ландшафтами разного типа или в древостоях, в целом нетипичных для территории исследования, по причине их высокого биоразнообразия, и т.п. Строго говоря, для задач геопространственного моделирования характеристик лесов необходимо создание специализированной сети наземного мониторинга, изначально спроектированной на основе данных ДЗЗ. При этом раскрытие и консолидация уже имеющихся материалов наземных обследований, получаемых из разных источников, могли бы стать первыми шагами на пути ее формирования. Результаты функционирования комплексной системы, сочетающей периодическое определение характеристик лесов на пробных площадях с их последующим геопространственным моделированием по спутниковым данным в масштабах регионов и всей страны, могут быть востребованы для широкого спектра прикладных и научных задач лесной отрасли, включая инвентаризацию ресурсов, оценку экосистемных функций и услуг, а также разработку сценариев устойчивого управления лесами.

Заключение. Результаты данной работы в полной мере демонстрируют базовые возможности использования разносезонных оптических спутниковых изображений высокого разрешения в сочетании с выборочными лесотаксационными материалами для задач геопространственного моделирования структурных и биометрических характеристик лесов в региональном масштабе. В своем исследовании мы не касались вопросов качества исходных таксационных данных, а сосредоточились в большей степени на методических аспектах, так как изначально имели возможность

использовать только исторические материалы лесоустройства и потому не ставили задачи получения актуальных и достоверных оценок параметров древостоев Брянской области. При этом полученные нами показатели точности в полной мере согласуются с результатами похожих зарубежных и российских работ.

Описанные принципы формирования набора исходных переменных и методика моделирования в достаточной степени универсальны и могут без значительных модификаций быть использованы при работе со спутниковыми данными сходного с Landsat типа (прежде всего, это Sentinel-2) и материалами наземных обследований в виде пробных площадей, а не выделов. Кроме того, на основе тех же данных и принципов может проводиться геопространственное моделирование широкого круга характеристик лесных экосистем, включая типологию и индикаторы биоразнообразия. Реализация автоматизированных этапов методики на платформе GEE потенциально позволяет получать тематические продукты для территорий неограниченного пространственного охвата (вплоть до глобального) при условии наличия достаточно представительной опорной выборки.

При этом необходимо учитывать, что оптические данные ДЗЗ имеют естественные ограничения, которые не позволяют моделировать параметры, имеющие отношение к стволам древостоев, с высокой точностью, что было показано и в нашем исследовании. Использование изображений более высокого пространственного разрешения и/или с увеличенным числом спектральных каналов, а также добавление текстурных признаков и дополнительных переменных (например, характеризующих рельеф местности) в большинстве случаев положительно сказывается на эффективности моделей, однако радикального улучшения точности предсказаний, как правило, не дает. Тем не менее, несмотря на умеренную локальную точность, при агрегации результатов моделирования даже на уровне территориальных единиц относительно небольшой площади (в нашем случае средняя площадь лесничеств была около 2 тыс. км²) наблюдается вполне приемлемая сходимость с официальными данными, что означает возможности получения достаточно достоверных оценок, как минимум, в масштабе регионов. Учитывая этот факт, а также доступность и распространенность данных Landsat и Sentinel-2, оценки, полученные на их основе, помимо широкого спектра научных задач, могли бы быть востребованы и для предстоящего второго цикла ГИЛ России.

Дальнейшие исследования в данном направлении ограничиваются, главным образом, малыми объемами доступной наземной информации о лесах России как в виде измерений на пробных

площадях, так и традиционных лесостроительных материалов. Создание объединенной сети мониторинга на базе существующих стационаров научных организаций, а также опубликование данных, собранных при проведении первого цикла ГИЛ, открыло бы принципиально новые возможности для геопространственного моделирования характеристик лесов на основе спутниковых изображений в масштабах всей страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- БГД – Регионы России. Социально-экономические показатели – 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: https://gks.ru/bgd/regl/b20_14p/Main.htm (дата обращения 25.03.2021).
- Гаврилюк Е.А., Горнов А.В., Еришов Д.В.* Оценка пространственного распределения видов деревьев заповедника “Брянский лес” и его охранной зоны на основе разносезонных спутниковых данных Landsat // Бюллетень Брянского отделения РБО. 2018. № 3(15). С. 13–23.
- Гиряев М.Д.* Теоретические основы лесоустройства и современное лесное законодательство // Лесохозяйственная информация. № 2. 2017. С. 5–15.
- Данилова И.В., Корец М.А., Рыжкова В.А.* Картографирование возрастных стадий лесной растительности на основе анализа разносезонных спутниковых изображений Landsat // Исследование Земли из космоса. 2017. № 4. С. 12–24.
- Денисова А.Ю., Кавеленова Л.М., Корчиков Е.С., Прохорова Н.Б., Терентьева Д.А., Федосеев Б.А.* Пространственная классификация преобладающих древесных пород на территории Самарской области по данным Sentinel-2 и таксации леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 86–101.
- Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Незамаев С.А., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А.* Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование 2013. № 3(19). С. 82–92.
- Лесной план Брянской области (по состоянию на 2008 г.) // Сайт Управления лесами Брянской области. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bryanskleshoz.ru/lesnoy-plan-bryanskoj-oblasti/> (дата обращения 25.03.2021).
- Лукина Н.В., Гераськина А.П., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Куприн А.В., Чернов Т.И., Чумаченко С.И., Шанин В.Н., Кузнецова А.И., Тебенькова Д.Н., Горнова М.В.* Биоразнообразие и климатомодерирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3. № 4. С. 1–90.
- Открытые данные // Сайт Управления лесами Брянской области. [Электронный ресурс]. URL: <https://bryanskleshoz.ru/otkrytye-dannye/> (дата обращения 25.03.2021).
- Отчет Счетной палаты Российской Федерации о результатах контрольного мероприятия “Проверка эффективности организации работ и расходования средств на проведение лесоустройства, выделенных из бюджетов бюджетной системы Российской Федерации и иных источников в 2015–2019 годах”. 2020. 40 с. <https://ach.gov.ru/upload/iblock/f1e/f1ecesa690699c189ed2eda14fff7413.pdf>
- Растительность европейской части СССР / Под ред. С.А. Грибовой, Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко. Л.: Наука, 1980. 429 с.
- Соколов В.А.* Проблемы лесоустройства в России // Сибирский лесной журн. 2021. № 1. С. 3–12.
- Сочилова Е.Н., Еришов 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.
- Сочилова Е.Н., Сурков Н.В., Еришов Д.В., Хамедов В.А.* Оценка запасов фитомассы лесных пород по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения (на примере лесов Ханты-Мансийского АО) // Вопросы лесной науки. 2018а. Т. 1. № 1. С. 1–23.
- Сочилова Е.Н., Сурков Н.В., Еришов Д.В., Егоров Б.А., Барталев С.С., Барталев С.А.* Картографирование классов бонитета лесов Приморского края на основе спутниковых изображений и данных о характеристиках рельефа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018б. Т. 15. № 5. С. 96–109.
- Чумаченко С.И., Паленова М.М., Починков С.В., Кухаркина Е.В.* Имитационное моделирование динамики насаждений fogrus-s – инструмент выбора стратегии и планирования лесного хозяйства // Лесной вестник. Forestry bulletin. № 5. 2007. С. 143–152.
- Altmann A., Tolosi L., Sander O., Lengauer T.* Permutation importance: a corrected feature importance measure // Bioinformatics. 2010. V. 26. P. 1340–1347.
- Astola H., Hame 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.
- Barredo J.I., Bastrup-Birk A., Teller A., Onaindia M., Fernández de Manuel B., Madariaga I., Rodríguez-Loiá G., Pinho P., Nunes A., Ramos A., Batista M., Mimo S., Cordovil C., Branquinho C., Grêt-Regamey A., Bebi P., Brunner S.H., Weibel B., Kopperoinen L., Itkonen P., Viinikka A., Chirici G., Bottalico F., Pesola L., Vizzarri M., Garfi V., Antonello L., Barbatí A., Corona P., Cullotta S., Giannico V., Laforteza R., Lombardi F., Marchetti M., Nocentini S., Riccioli F., Travaglini D., Sallustio L., Rosário I., Essen M., Nicholas K.A., Máguas C., Rebelo R., Santos-Reis M., Santos-Martín F., Zorrilla-Miras P., Montes C., Benayas J., Martín-López B., Snäll T., Berglund H., Bengtsson J., Moen J., Busetto L., San-Miguel-Ayanz J., Thurner M., Beer C., Santoro M., Carvalhais N., Wutzler T., Schepaschenko D., Shvidenko A.,*

- Kompter E., Ahrens B., Levick S.R., Schmullius C.* Mapping and assessment of forest ecosystems and their services – Applications and guidance for decision making in the framework of MAES. EUR 27751 EN. 2015. 82 p.
- Breiman L.* Out-of-bag estimation // Technical report. Berkeley: Statistics Department University of California, 1996. P. 1–13.
- Breiman L.* Random forests // Machine Learning. 2001. V. 45. № 1. P. 5–32.
- Brockerhoff E.G., Barbaro L., Castagneyrol B., Forrester D.I., Gardiner B., González-Olabarria J.R., Lyver P.O., Meurisse N., Oxbrough A., Taki H., Thompson I.D., Plas F., Jactel H.* Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services // Biodiversity and Conservation. 2017. V. 26. P. 3005–3035.
- Brosfokske K.D., Froese R.E., Falkowski M.J., Banskota A.* A Review of Methods for Mapping and Prediction of Inventory Attributes for Operational Forest Management // Forest Science. 2014. V. 60. № 4. P. 733–756.
- Brown C.E.* Coefficient of Variation // Applied Multivariate Statistics in Geohydrology and Related Sciences. Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. 248 p.
- Crippen R.E.* Calculating the vegetation index faster // Remote Sensing of Environment. 1990. V. 34. P. 71–73.
- ESA Sentinel-2 [Электронный ресурс]. URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2 (дата обращения 24.03.2021).
- Fagan M., DeFries R.* Measurement and Monitoring of the World's Forests. A Review and Summary of Remote Sensing Technical Capability, 2009–2015. Resources for the Future Report. 2009. 129 p.
- Fassnacht F., Latifi H., Stereńczak K., Modzelewska A., Lefsky M., Waser L., Straub C., Ghosh A.* Review of studies on tree species classification from remotely sensed data // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 186. P. 64–87.
- Friedl M., Gray J., Sulla-Menashe D.* MCD12Q2 MODIS/Terra + Aqua Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2019. [Электронный ресурс]. (дата обращения 02.12.2020). <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q2.006>
- Gómez C., White J.C., Wulder M.A.* Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 116. P. 55–72.
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Pyushchenko S., Thau D., Moore R.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18–27.
- 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. P. 850–853.
- Jiang Z., Huete A.R., Didan K., Miura T.* Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band // Remote Sensing Environment. 2008. V. 112. P. 3833–3845.
- Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E.* EFIMOD 2 – a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecological Modelling. 2003. V. 170. № 2–3. P. 373–392.
- Kumar L., Mutanga O.* Google Earth Engine Applications since Inception: Usage, Trends, and Potential // Remote Sensing. 2018. № 10. P. 1509.
- Landsberg J.* Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges, and future directions // Canadian J. Forest Research. 2003. V. 33. № 3. P. 385–397.
- Lechner A.M., Foody G.M., Boyd D.S.* Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management // One Earth. 2020. V. 2. № 5. P. 405–412.
- Li H.* Smile – Statistical Machine Intelligence and Learning Engine. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://haifengl.github.io> (дата обращения 24.03.2021).
- Masek J.G., Vermote E.F., Saleous N.E., Wolfe R., Hall F.G., Huemmrich K.F., Gao F., Kutler J., Lim T.K.* A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000 // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2006. V. 3. № 1. P. 68–72.
- Matasci G., Hermosilla T., Wulder M.A., White J.C., Coops N.C., Hobart G.W., Zald H.S.* Large-area mapping of Canadian boreal forest cover, height, biomass and other structural attributes using Landsat composites and lidar plots // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 209. P. 90–106.
- NASA Terra MODIS [Электронный ресурс]. URL: <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis> (дата обращения 24.03.2021)
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2020, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>
- Sanchez-Ruiz S., Moreno-Martinez A., Izquierdo-Verdiguier E., Chiesi M., Maselli F., Gilabert M.A.* Growing stock volume from multi-temporal Landsat imagery through Google Earth Engine // International J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019. V. 83. № 101913. P. 1–10.
- Schumacher J., Hauglin M., Astrup R., Breidenbach J.* Mapping forest age using National Forest Inventory, airborne laser scanning, and Sentinel-2 data // Forest Ecosystems. 2020. V. 7. № 1. P. 1–14.
- Senf C., Laštovička J., Okujeni A., Heurich M., van der Linden S.* A generalized regression-based unmixing model for mapping forest cover fractions throughout three decades of Landsat data // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 240. № 111691. P. 1–10.
- Shao Y., Di L., Bai Y., Guo B., Gong J.* Geoprocessing on the Amazon cloud computing platform – AWS // First International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics), Shanghai, China. 2012. P. 1–6.
- Shit P.K., Pourghasemi H.R., Das P., Bhunia G.S.* Spatial Modeling in Forest Resources Management: Rural Livelihood and Sustainable Development // Springer Nature. 2021. 675 p.
- Stuhler S., Leiterer R., Joerg P., Wulf H., Schaeppman M.* Technical Report: Generating a Cloud-Free, Homogeneous Landsat-8 Mosaic of Switzerland Using Google

- Earth Engine. 2016. [Электронный ресурс]. (дата обращения 29.12.2020).
<https://doi.org/10.13140/rg.2.1.2432.0880>
- USGS Landsat 7 [Электронный ресурс]. URL: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con (дата обращения 24.03.2021).
- USGS Landsat Missions [Электронный ресурс]. URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat> (дата обращения 24.03.2021).
- White J.C., Coops N.C., Wulder M.A., Vastaranta M., Hilker T., Tompalski P. Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review // Canadian J. Remote Sensing, 2016. V. 42. № 5. P. 619–641.
- Wright M.N., Ziegler A. A Fast Implementation of Random Forests for High Dimensional Data in C++ and R // J. Statistical Software. 2017. V. 77. № 1. P. 1–17.
- Wulder M.A., Loveland T.R., Roy D.P., Crawford C.J., Masek J.G., Woodcock C.E., Allen R.G., Anderson M.C., Belward A.S., Cohen W.B., Dwyer J., Erb A., Gao F., Griffiths P., Helder D., Hermosilla T., Hipple J.D., Hostert P., Hughes M.J., Huntington J., Johnson D.M., Kennedy R., Kilic A., Li Z., Lyburner L., McCorkel J., Pahlevan N., Scambos T.A., Schaaf C., Schott J.R., Sheng Y., Storey J., Vermote E., Vogelmann J., White J.C., Wynne R.H., Zhu Z. Current status of Landsat program, science, and applications // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 225. P. 127–147.
- Yu X., Hyypä J., Karjalainen M., Nurminen K., Karila K., Vastaranta M., Kankare V., Kaartinen H., Holopainen M., Honkavaara E., Kukko A., Jaakkola A., Liang X., Wang Y., Hyypä H., Katoh M. Comparison of Laser and Stereo Optical, SAR and InSAR Point Clouds from Air- and Space-Borne Sources in the Retrieval of Forest Inventory Attributes // Remote Sensing. 2015. V. 7. № 12. P. 15933–15954.
- Zhao P., Lu D., Wang G., Wu C., Huang Y., Yu S. Examining Spectral Reflectance Saturation in Landsat Imagery and Corresponding Solutions to Improve Forest Aboveground Biomass Estimation // Remote Sensing. 2016. V. 8. № 469. P. 1–26.
- Zharko V.O., Bartalev S.A., Sidorenkov V.M. Forest growing stock volume estimation using optical remote sensing over snow-covered ground: a case study for Sentinel-2 data and the Russian Southern Taiga region // Remote Sensing Letters. 2020. V. 11. № 7. P. 677–686.

Geospatial Modeling of Biometric and Structural Forest Attributes in the Bryansk Oblast Based on Satellite Imagery and Selective Inventory Data

E. A. Gavriluk¹*, N. V. Koroleva¹, D. A. Karpukhina¹, E. N. Sochilova¹, and D. V. Ershov¹

¹Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS),
 Profsoyuznaya st., 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

*E-mail: egor@ifi.rssi.ru

The geospatial modeling capabilities of biometric (stand age, height, stem diameter, growing stock volume) and structural (coniferous and deciduous species stock ratio) forests attributes based on Landsat multi-seasonal satellite imagery and selective forest inventory data at regional scale, specifically for the Bryansk oblast of Russian Federation, were assessed. The reference sample for models training and testing was obtained from taxation descriptions for approximately 10000 forest sites with a total area of about 35 thousand hectares. Used satellite data were temporary synchronized with a period of taxation works (2002–2005). The main stages of geospatial modeling, including the compositing of multi-seasonal mosaic images, the calculation of spectral variables and the extraction of their values in the locations of reference sites, the training of Random forest regression models and the prediction over the study area, was performed on the Google Earth Engine cloud platform. The best results were obtained for coniferous and deciduous species stock ratio models – coefficient of determination $R^2 = 0.7$ with a scaled root-mean-square error RMSE = 22%. For biometric attributes R^2 varied from 0.4 for stand age to 0.5 for growing stock volume, and RMSE was in the range of 26–37%. Such accuracy levels are fully consistent with the results of similar Russian and foreign studies. The obtained thematic products demonstrated high convergence with official statistics data at forestry scale: squared correlation coefficient $r^2 = 0.98$ with a scaled mean deviation MD = 5% for the forested area and $r^2 = 0.96$ with MD = 8.6% for the total growing stock. To conclude, the combination of the initial data and methods of their processing described in our work can be used for obtaining reliable estimates of the biometric and structural forest attributes, at least, at the federal subject's scale.

Keywords: forest stand age, forest stand height, tree stem diameter, growing stock volume, coniferous and deciduous species ratio, remote sensing, Landsat, Random Forest, Google Earth Engine.

Acknowledgements: This study was performed within the framework of the state assignment of the CEPF RAS no. AAAA-A18-118052590019-7 (data processing), and was financially supported by the Russian Science Foundation project no. 19-77-30015 (data collection and scripting).

REFERENCES

- Altmann A., Tolosi L., Sander O., Lengauer T., Permutation importance: a corrected feature importance measure, *Bioinformatics*, 2010, Vol. 26, pp. 1340–1347.
- Astola H., Hame 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.
- Barredo J.I., Bastrup-Birk A., Teller A., Onaindia M., Fernández de Manuel B., Madariaga I., Rodríguez-Loiñaz G., Pinho P., Nunes A., Ramos A., Batista M., Mimo S., Cordovil C., Branquinho C., Grêt-Regamey A., Bebi P., Brunner S.H., Weibel B., Kopperoinen L., Itkonen P., Viinikka A., Chirici G., Bottalico F., Pesola L., Vizzarri M., Garfi V., Antonello L., Barbati A., Corona P., Cullotta S., Giannico V., Laforteza R., Lombardi F., Marchetti M., Nocentini S., Riccioli F., Travaglini D., Sallustio L., Rosário I., Essen M., Nicholas K.A., Máguas C., Rebelo R., Santos-Reis M., Santos-Martín F., Zorrilla-Miras P., Montes C., Benayas J., Martín-López B., Snäll T., Berglund H., Bengtsson J., Moen J., Busetto L., San-Miguel-Ayán J., Thurner M., Beer C., Santoro M., Carvalhais N., Wutzler T., Schepaschenko D., Shvidenko A., Kompter E., Ahrens B., Levick S.R., Schmullius C., *Mapping and assessment of forest ecosystems and their services – Applications and guidance for decision making in the framework of MAES*. EUR 27751 EN, 2015, 82 p.
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Satellite mapping of vegetation cover of Russia), M.: Izd-vo IKI RAN, 2016, 208 p.
- Breiman L., Out-of-bag estimation, In: *Technical report*. Berkeley: Statistics Department University of California, 1996, pp. 1–13.
- Breiman L., Random forests, *Machine Learning*, 2001, Vol. 45. No. 1, pp. 5–32.
- Brocknerhoff E.G., Barbaro L., Castagneyrol B., Forrester D.I., Gardiner B., González-Olabarria J.R., Lyver P.O., Meurisse N., Oxbrough A., Taki H., Thompson I.D., Plas F., Jactel H., Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services, *Biodiversity and Conservation*, 2017, Vol. 26, pp. 3005–3035.
- Broszofski K.D., Froese R.E., Falkowski M.J., Banskota A., A Review of Methods for Mapping and Prediction of Inventory Attributes for Operational Forest Management, *Forest Science*, 2014, Vol. 60, No. 4, pp. 733–756.
- Brown C.E., Coefficient of Variation, In: *Applied Multivariate Statistics in Geohydrology and Related Sciences*, Berlin, Heidelberg: Springer, 1998, 248 p.
- Chumachenko S.I., Palenova M.M., Pochinkov S.V., Kukharkina E.V., Imitatsionnoye modelirovaniye dinamiki nasazhdenii. FORRUS-S – instrument vybora strategii i planirovaniya lesnogo khozyaystva (Simulation of the stand dynamics. FORRUS-S – a testing tool of strategic options and forest management planning), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoi vestnik*, 2007, No. 5, pp. 143–152.
- Crippen R.E., Calculating the vegetation index faster, *Remote Sensing of Environment*, 1990, Vol. 34, pp. 71–73.
- Danilova I.V., Korets M.A., Ryzhkova V.A., Kartografirovaniye vozrastnykh stadii lesnoi rastitel'nosti na osnove analiza raznosezonnykh sputnikovykh izobrazhenii Landsat (Regenerating vegetation age stages mapping based on multi-seasonal landsat satellite imagery), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 4, pp. 12–24.
- Denisova A.Y., Kavelenova L.M., Korchikov E.S., Prokhorova N.B., Terent'eva D.A., Fedoseev B.A., Prostranstvennaya klassifikatsiya preobladayushchikh drevesnykh porod na territorii Samarskoi oblasti po dannym Sentinel-2 i taksatsii lesa (Tree species classification in Samara region using Sentinel-2 remote sensing images and forest inventory data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 86–101.
- Fagan M., DeFries R., *Measurement and Monitoring of the World's Forests. A Review and Summary of Remote Sensing Technical Capability, 2009–2015*. Resources for the Future Report, 2009, 129 p.
- Fassnacht F., Latifi H., Stereńczak K., Modzelewska A., Lefsky M., Waser L., Straub C., Ghosh A., Review of studies on tree species classification from remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 186, pp. 64–87.
- Friedl M., Gray J., Sulla-Menashe D., MCD12Q2 MODIS/Terra + Aqua Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2019. Available at: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q2.006> (December 02, 2020).
- Gavrilyuk E.A., Gornov A.V., Ershov D.V., Otsenka prostranstvennogo raspredeleniya vidov derev'ev zapovednika "Bryanskii les" i ego okhrannoi zony na osnove raznosezonnykh sputnikovykh dannyykh Landsat (Estimation of spatial trees species distribution in Bryansk Forest Nature Reserve based on multitemporal Landsat data), *Byulleten' Bryanskogo otdeleniya RBO*, 2018, No. 3(15), pp. 13–23.
- Giryayev M.D., Teoreticheskie osnovy lesoustroystva i sovremennoye lesnoye zakonodatel'stvo (Theoretical basis of modern forest management and forest law), *Lesokhozyaystvennaya informatsiya*, 2017, No. 2, pp. 5–15.
- Gómez C., White J.C., Wulder M.A., Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, Vol. 116, pp. 55–72.
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 202, pp. 18–27.
- 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, pp. 850–853.
- http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2 (March 24, 2021).
- <https://bryanskleshoz.ru/otkrytye-dannye/> (March 25, 2021).
- https://gks.ru/bgd/regl/b20_14p/Main.htm (March 25, 2021).
- <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis> (March 24, 2021).

- https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con (March 24, 2021).
- <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat> (March 24, 2021).
- Jiang Z., Huete A.R., Didan K., Miura T., Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band, *Remote Sensing Environment*, 2008, Vol. 112, pp. 3833–3845.
- Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E., EFMOD 2 – a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems, *Ecological Modelling*, 2003, Vol. 170, No. 2–3, pp. 373–392.
- Kumar L., Mutanga O., Google Earth Engine Applications since Inception: Usage, Trends, and Potential, *Remote Sensing*, 2018, No. 10, pp. 1509.
- Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Nezamaev S.A., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Y.A., Tematicheskoe kartirovanie i stratifikatsiya lesov Mariiskogo Zavolzh'ya po sputnikovym snimkam Landsat (Thematic mapping and stratification of forests in Middle Zavolzhie by Landsat satellite images), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2013, No. 3(19), pp. 82–92.
- Landsberg J., Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges, and future directions, *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, Vol. 33, No. 3, pp. 385–397.
- Lechner A.M., Foody G.M., Boyd D.S., Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management, *One Earth*, 2020, Vol. 2, No. 5, pp. 405–412.
- Lesnoi plan Bryanskoi oblasti (po sostoyaniyu na 2008 g.) (Forest planning of Bryansk region (as of 2008)). Available at: <https://www.bryanskleshoz.ru/lesnoy-plan-bryanskoy-oblasti/> (March 25, 2021).
- Li H., available at: <https://haifengl.github.io> (March 24, 2021).
- Lukina N.V., Geras'kina A.P., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Kuprin A.V., Chernov T.I., Chumachenko S.I., Shanin V.N., Kuznetsova A.I., Teben'kova D.N., Gornova M.V., Bioraznoobrazie i klimatoreguliruyushchie funktsii lesov: aktual'nye voprosy i perspektivy issledovaniya (Biodiversity and climate regulating functions of forests: current issues and prospects for research), *Voprosy lesnoi nauki*, 2020, Vol. 3, No. 4, pp. 1–90.
- Masek J.G., Vermote E.F., Saleous N.E., Wolfe R., Hall F.G., Huemmrich K.F., Gao F., Kutler J., Lim T.K., A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, Vol. 3, No. 1, pp. 68–72.
- Matasci G., Hermosilla T., Wulder M.A., White J.C., Coops N.C., Hobart G.W., Zald H.S., Large-area mapping of Canadian boreal forest cover, height, biomass and other structural attributes using Landsat composites and lidar plots, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 209, pp. 90–106.
- Otchet Schetnoi palaty Rossiiskoi Federatsii o rezul'tatakh kontrol'nogo meropriyatiya "Proverka effektivnosti organizatsii rabot i raskhodovaniya sredstv na provedenie lesoustroistva, vydeleniykh iz byudzheta byudzhetoj sistemy Rossiiskoi Federatsii i inyx istochnikov v 2015–2019 godakh" (Report of the Accounts Chamber of the Russian Federation on the results of the control measure "Checking the effectiveness of the organization of work and spending of funds for forest management allocated from the budgets of the budgetary system of the Russian Federation and other sources in 2015–2019"), 2020, 40 p. Available at: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/fl1e/fl1ecec690699c189ed2eda14fff7413.pdf>
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2020, Vienna, Austria. Available at: <https://www.R-project.org/>
- Rastitel'nost' evropeiskoi chasti SSSR (The vegetation of the European part of the USSR), Leningrad: Nauka, 1980, 429 p.
- Sanchez-Ruiz S., Moreno-Martinez A., Izquierdo-Verdiguier E., Chiesi M., Maselli F., Gilabert M.A., Growing stock volume from multi-temporal Landsat imagery through Google Earth Engine, *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, Vol. 83, No. 101913, pp. 1–10.
- Schumacher J., Hauglin M., Astrup R., Breidenbach J., Mapping forest age using National Forest Inventory, airborne laser scanning, and Sentinel-2 data, *Forest Ecosystems*, 2020, Vol. 7, No. 1, pp. 1–14.
- Senf C., Laštovička J., Okujeni A., Heurich M., van der Linden S., A generalized regression-based unmixing model for mapping forest cover fractions throughout three decades of Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 240, No. 111691, pp. 1–10.
- Shao Y., Di L., Bai Y., Guo B., Gong J., Geoprocessing on the Amazon cloud computing platform – AWS, *First International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, Shanghai, China, 2012, pp. 1–6.
- Shit P.K., Pourghasemi H.R., Das P., Bhunia G.S., *Spatial Modeling in Forest Resources Management: Rural Livelihood and Sustainable Development*, Springer Nature, 2021, 675 p.
- Sochilova E.N., Ershov D.V., Analiz vozmozhnosti opredeleniya zapasov drevesnykh porod po sputnikovym dannym Landsat ETM+ (Possibility analysis of stem volume of forests assessment using Landsat ETM data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 277–282.
- Sochilova E.N., Surkov N.B., Ershov D.B., Egorov B.A., Bartalev S.S., Bartalev S.A., Kartografirovaniye klassov boniteta lesov Primorskogo kraja na osnove sputnikovyx izobrazheniy i dannykh o kharakteristikakh rel'efa (Mapping of forest site index classes in Primorskiy kraj based on satellite images and terrain characteristics), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 96–109.
- Sochilova E.N., Surkov N.V., Ershov D.V., Khamedov V.A., Otsenka zapasov fitomassy lesnykh porod po sputnikovym izobrazheniyam vysokogo prostranstvennogo razresheniya (na primere lesov Khanty-Mansiiskogo AO) (Assessment of biomass of forest species using satellite images of high spatial resolution (on the example of the forest of Khanty-Mansi autonomous okrug)), *Voprosy lesnoi nauki*, 2018a, Vol. 1, No. 1, pp. 1–23.
- Sokolov V.A., Problemy lesoustroistva v Rossii (Problems of forest planning in Russia), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2021, No. 1, pp. 3–12.
- Stuhler S., Leiterer R., Joerg P., Wulf H., Schaepman M., Technical Report: Generating a Cloud-Free, Homogeneous Landsat-8 Mosaic of Switzerland Using Google

Earth Engine. 2016. Available at:

<https://doi.org/10.13140/rg.2.1.2432.0880> (December 29, 2020).

White J.C., Coops N.C., Wulder M.A., Vastaranta M., Hilker T., Tompalski P., Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review, *Canadian J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 42, No. 5, pp. 619–641.

Wright M.N., Ziegler A., A Fast Implementation of Random Forests for High Dimensional Data in C++ and R, *J. Statistical Software*, 2017, Vol. 77, No. 1, pp. 1–17.

Wulder M.A., Loveland T.R., Roy D.P., Crawford C.J., Masek J.G., Woodcock C.E., Allen R.G., Anderson M.C., Belward A.S., Cohen W.B., Dwyer J., Erb A., Gao F., Griffiths P., Helder D., Hermosilla T., Hipple J.D., Hostert P., Hughes M.J., Huntington J., Johnson D.M., Kennedy R., Kilic A., Li Z., Lymburner L., McCorkel J., Pahlevan N., Scambos T.A., Schaaf C., Schott J.R., Sheng Y., Storey J., Vermote E., Vogelmann J., White J.C., Wynne R.H., Zhu Z., Current status of Landsat program, science, and applica-

tions, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 225, pp. 127–147.

Yu X., Hyypä J., Karjalainen M., Nurminen K., Karila K., Vastaranta M., Kankare V., Kaartinen H., Holopainen M., Honkavaara E., Kukko A., Jaakkola A., Liang X., Wang Y., Hyypä H., Kato M., Comparison of Laser and Stereo Optical, SAR and InSAR Point Clouds from Air- and Space-Borne Sources in the Retrieval of Forest Inventory Attributes, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, No. 12, pp. 15933–15954.

Zhao P., Lu D., Wang G., Wu C., Huang Y., Yu S., Examining Spectral Reflectance Saturation in Landsat Imagery and Corresponding Solutions to Improve Forest Aboveground Biomass Estimation, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 469, pp. 1–26.

Zharko V.O., Bartalev S.A., Sidorenkov V.M., Forest growing stock volume estimation using optical remote sensing over snow-covered ground: a case study for Sentinel-2 data and the Russian Southern Taiga region, *Remote Sensing Letters*, 2020, Vol. 11, No. 7, pp. 677–686.