

МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗРАСТА ДЕРЕВЬЕВ И ДРЕВОСТОЕВ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ЕВРАЗИИ ПО МОРФОМЕТРИИ КРОН И ПОЛОГА, ДОСТУПНОЙ ДЛЯ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

В.А. Усольцев

Ботанический сад УрО РАН и Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

Эл. почта: Usoltsev50@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.08.2024; принята к печати 22.10.2024

Возраст древостоя – важный показатель сукцессионной динамики лесных экосистем после внешних воздействий и повреждений – играет ключевую роль в проведении лесохозяйственных мероприятий и сохранении биоразнообразия. Возраст влияет на долгосрочную динамику углеродного баланса лесов, потенциал связывания углерода и перспективы достижения углеродной нейтральности. Современные методы дистанционного зондирования дают возможность оценивать возраст на уровне как отдельного древостоя, так и их совокупностей на больших площадях. Лидарные технологии с применением дронов перспективны при локальных оценках возраста деревьев и древостоев по их морфометрическим показателям, однако такие исследования довольно редки. Цель нашего исследования состояла в построении моделей зависимости возраста деревьев и древостоев от их основных морфометрических показателей, доступных для лидарного сканирования. Основой для исследования послужили две авторские базы данных, из которых были взяты данные измерений 5320 модельных деревьев и 5817 древостоев 13 лесобразующих родов Евразии. У аллометрических моделей зависимости возраста дерева от его высоты и диаметра кроны коэффициенты детерминации от 0,60 до 0,66. Вклады высоты дерева и диаметра кроны в объяснение изменчивости возраста деревьев составили соответственно 71 и 29%. У аллометрических моделей зависимости возраста древостоев от их высоты и густоты коэффициенты детерминации от 0,45 до 0,89. Вклады средней высоты древостоя и его густоты в изменчивость возраста составляют соответственно 54 и 46%. Предложенные модели могут быть использованы при оценке возраста деревьев и древостоев лесобразующих родов Евразии с помощью бортовых лидарных технологий, в том числе с применением дронов. *Ключевые слова:* лесобразующие роды Евразии, возраст деревьев и древостоев, морфометрические показатели, аллометрические модели.

MODELS FOR ESTIMATING THE AGE OF TREES AND STANDS OF FOREST-FORMING SPECIES OF EURASIA BASED ON CROWN AND CANOPY MORPHOMETRY AVAILABLE FOR AERIAL LASER SCANNING

V.A. Usoltsev

Ural State Forest Engineering University and Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Email: Usoltsev50@mail.ru

The age of a forest stand is an important indicator reflecting succession dynamics of forest ecosystem after external influences and damages. It plays a key role in forestry activities and in preserving of biodiversity. Forest age influences the long-term dynamics of carbon balance, the potential for carbon sequestration and prospects for achieving carbon neutrality. Modern remote sensing methods make it possible to estimate the age of both an individual stand and stand aggregates over large areas. Lidar technologies using drones are promising for local estimates of the age of trees and stands based on their morphometric indicators; however, such studies are quite rare. The purpose of the present study was to develop models of the dependence of the age of trees and stands on their basic morphometric indicators available for lidar scanning. The study was based on two original databases, from which measurement data related to 5320 model trees and 5817 stands of 13 forest-forming genera of Eurasia were taken. In allometric models of the dependence of the age of a tree on its height and crown diameter, determination coefficients range from 0.60 to 0.66. The contributions of tree height and crown diameter to the variability of tree age are 71 and 29% respectively. In allometric models of the dependence of the age of stands on their height and density, determination coefficients range from 0.45 to 0.89. The contributions of the average height of a stand and its density to the variability of age are 54 and 46% respectively. The proposed models can be used for estimating the age of trees and stands of forest-forming genera of Eurasia using airborne lidar technologies, including the use of drones.

Keywords: forest-forming genera of Eurasia, height of trees and stands, morphometric indicators, allometric models.

Введение

Возраст насаждений является важным показателем, отражающим сукцессионную динамику после внешних воздействий и повреждений, играет ключевую роль при назначении и проведении лесохозяйственных мероприятий и заготовки древесины [46] и сохранении биоразнообразия [36]. Возраст является основополагающим фактором, влияющим на долгосрочную динамику углеродного баланса лесов [17, 18, 26, 52], потенциал связывания углерода [24, 37, 39, 50] и перспективы достижения углеродной нейтральности [48]. Возраст насаждений является важнейшим параметром, определяющим состояние лесных экосистем. Однако при отсутствии данных об изменении возрастной структуры насаждений в пространстве и времени становится невозможным учет истории нарушений и восстановления лесов, что приводит к увеличению неопределенности в оценках их углерод депонирующей способности [27, 33].

В статье «Лес и математика» [4] проф. К.Е. Никитин пишет: «Изучая рост древостоев по высоте, диаметру, запасу древесины и пр., лесовод учитывает, что числовые значения этих показателей изменяются и зависят от многих причин. Однако при прочих равных условиях изменение их находится в зависимости от возраста насаждений. В этом случае можно сказать, что любой из названных показателей является функцией возраста» (с. 25). С возрастом связан такой основополагающий биопродукционный показатель, как чистая первичная продукция (ЧПП). Для моделирования и прогнозирования углеродного цикла в лесах необходимы надежные взаимосвязи между ЧПП и возрастом насаждений. Известно, что ЧПП с возрастом увеличивается, достигает максимального значения при смыкании полога и затем постепенно снижается [29]. Напротив, гетеротрофное дыхание в лесу сначала снижается с возрастом в результате истощения почвенного углерода, а затем возрастает по мере увеличения почвенного запаса углерода в результате разложения лесной подстилки [16]. При таких соотношениях между возрастом древостоя, ЧПП и гетеротрофным дыханием чистая экосистемная продукция и запасы углерода в экосистеме в значительной степени зависят от возраста насаждения [24, 34]. Однако информацию о возрасте насаждений редко включали в разрабатываемые модели углеродного цикла из-за отсутствия надежной информации о его пространственном распределении. В целом, получить надежную крупномасштабную информацию о возрасте насаждений с высоким пространственным разрешением довольно сложно [30, 53]. Тем не менее, точное картирование возраста лесов имеет большое значение для управления лесным хозяйством и моделирования углеродного цикла [31].

Современные технологии лидарного зондирования обеспечивают крупномасштабное картографи-

рование лесов с получением трехмерной информации о структуре лесного полога, степени деградации лесов, надземной фитомассе, первичной продукции и биоразнообразию. Общемировой библиометрический анализ по данной теме на основе 412 публикаций, проиндексированных в базе данных Scopus за период 2004–2022 годов, показал, что за последние пять лет количество публикаций нарастало в геометрической прогрессии [10]. Использование данных дистанционного зондирования с применением методов нейронных сетей показало обнадеживающие результаты по идентификации породного состава лесного полога [25].

Возможность составления крупномасштабных карт возраста насаждений предоставляет дистанционное спутниковое зондирование [46, 49]. При калибровке и валидации результатов оно опирается на данные полевых измерений возраста, и это сочетание обеспечивает перспективный способ территориального картирования возраста лесных насаждений. Например, в Северной Америке для крупномасштабного картирования возраста лесных насаждений были использованы эмпирические зависимости между полученным со спутника индексом их повреждения и временем, прошедшим с момента последнего пожара [12, 37]. Однако для количественной привязки индекса повреждения к возрасту древостоя по этому методу требуются данные датирования пожарных подсушин, которые обычно недоступны. Кроме того, леса имеют повреждения не только от лесных пожаров, и совмещение нескольких типов нарушений приводит к существенной неопределенности. В другом исследовании при составлении национальной карты возраста древостоев были объединены данные лесной инвентаризации с полученным со спутника вегетационным индексом NDVI, вычисляемым по значениям спектральной яркости пикселей в красной и ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра [20]. На территории Лессового Плато в Китае была составлена карта распределения возраста лесов с помощью алгоритма LandTrendr. Алгоритм дал возможность довольно точно определить начало пост-пирогенной восстановительной динамики растительности по годичной траектории нормализованного индекса гарей NBR (Normalized Burn Ratio), основанного на соотношении ближнего инфракрасного и среднего инфракрасного каналов [11]. Сравнение с наземными данными показало наличие среднеквадратической ошибки, равной 2,1 года [30].

При составлении крупномасштабных карт возраста насаждений в последние годы применяют методы машинного обучения, которые позволяют учитывать сложные взаимосвязи между их возрастом и всеми связанными с ним экзо- и эндогенными переменными [42]. В отличие от биологически обоснованных уравнений

связи высоты и возраста древостоев, машинное обучение имеет корреляционный характер [31]. Методы машинного обучения были использованы для составления глобальной карты возраста лесов с разрешением 1000 м на основе климатических данных и данных о биомассе из проекта Globbiomass (агрегированных с разрешением от 100 до 1000 м с использованием метода билинейной повторной выборки) [14]. На исследовательском полигоне в сухих тропических лесах Коста-Рики выполнено картирование возраста насаждений с использованием набора гиперспектральных данных, бортового лидара полной формы волны и трех методов машинного обучения [43]. Для картирования возраста насаждений на юге Китая были объединены методы выборочного анализа насаждений и отслеживания изменений растительности во времени и пространстве [21]. Поскольку различные методы машинного обучения показали разную точность при картировании возраста насаждений, был сделан вывод о необходимости их сравнительного анализа на основе количественной оценки вклада различных входных переменных с целью обоснования их выбора при калибровке по данным полевых измерений [31].

С использованием упомянутых методов было выполнено картирование возраста насаждений с разрешением 1000 м и среднеквадратичной ошибкой 12 лет на основе уравнений роста древостоев по типам леса и регионам Китая. Затем для уточнения взаимосвязи между возрастом и высотой древостоев при картировании были добавлены данные о температуре, осадках и высоте над уровнем моря [51, 53]. Было показано, что разрешение 1000 м позволяло усреднить высоту совокупности лесных насаждений с точностью до пикселя, что приводило к завышению оценок возраста в молодых насаждениях и занижению в спелых [31]. С помощью космического лидарного аппарата Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) были получены данные с высокой плотностью выборки, необходимой для описания структурных характеристик глобальных лесов [22]. Основываясь на наблюдениях GEDI, предоставленных спутником Landsat, и данных ICESat-2, в Китае было выполнено национальное картирование возраста насаждений с пространственным разрешением 30 м [32].

В лесных экосистемах Канады для оценки возраста насаждений на основе данных Landsat с пространственным разрешением 30 м были объединены три подхода [36]. При первом подходе используются протоколы обнаружения изменений в нарушениях древостоев за период с 1985 по 2019 год, а время, прошедшее с момента нарушения, использовано в качестве показателя их возраста. При втором подходе используются композиции с коэффициентами отражения поверхности со спутника Landsat для идентификации пикселей, свидетельствующих о восстановлении после на-

рушения, произошедшем в течение двадцати лет до 1985 года. Наконец, инвертированные аллометрические уравнения связи между возрастом древостоя и высотой полога объединяются с картами таксационной структуры лесов и показателями продуктивности с целью оценить возраст насаждения для тех пикселей, которые не показывали признаков нарушений древостоев максимум до 150 лет. Комбинированием названных трех подходов рассчитаны возрасты насаждений для каждого пикселя лесных экосистем Канады. Эти пространственно-точные карты возраста насаждений предоставили важную информацию для понимания функционирования лесных экосистем и обоснования широкого спектра политических, научных и управленческих потребностей [36].

В России в связи с ежегодно повторяющимися на огромных территориях лесными пожарами, а также с вырубкой древостоев, в том числе, несанкционированной [2], картирование возрастной структуры лесов на основе дистанционного зондирования является насущной необходимостью, однако такие исследования проводятся сравнительно редко [6, 19, 42].

Возраст дерева и древостоя традиционно измеряется путем отбора кернов на стволах деревьев, что представляет довольно трудозатратный процесс [15, 40, 47]. Кроме того, существует проблема репрезентативности, когда возраст, полученный по модельным деревьям, может не соответствовать среднему возрасту насаждения, а количество пробных площадей недостаточно для охвата больших территорий [46]. Возраст древостоя также может быть оценен с помощью уравнения регрессии с использованием фотограмметрически определенных высоты древостоя и размера кроны в качестве прогностических переменных, однако в подобных ситуациях неопределенность оценок довольно высока, и вместо возраста устанавливается лишь один из 20-летних классов возраста [45]. Более точные оценки морфологии крон и, как следствие, возраста деревьев и древостоев обеспечиваются воздушными лидарными технологиями [23], в том числе с применением дронов [38]. В ельниках Норвегии была исследована связь возраста древостоев разных классов бонитета с их средней высотой, зарегистрированной бортовым лидарным устройством. Установлено увеличение коэффициента детерминации R^2 с 0,46 до 0,96 по мере повышения класса бонитета [41]. В Китае связь возраста древостоя с его средней высотой характеризовалась величиной R^2 на уровнях провинции и региона соответственно 0,53 и 0,87 [52]. В другом исследовании по Китаю названная связь оценивалась на уровне R^2 , равном 0,56 [49], и в насаждениях Финляндии – на уровне 0,71 [35].

Для расчета двухфакторных моделей зависимости возраста дерева от его высоты и диаметра кроны в Финляндии были получены данные измерений

11246 растущих деревьев, в том числе 5303 сосны обыкновенной, 3661 ели европейской и 2282 березы. Для измерения высоты дерева использовался гипсометр Суунто, возраст дерева определялся с помощью возрастного бурава, а диаметр кроны – прибором Каянуса [28]. Выполнен анализ данных согласно трем видам аллометрических моделей

$$\ln A = a_0 + a_1 \ln H, \quad (1)$$

$$\ln A = a_0 + a_1 \ln D_c, \quad (2)$$

$$\ln A = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_c, \quad (3)$$

где: A – возраст дерева, лет; H – высота дерева, дм; D_c – диаметр кроны, дм.

Было установлено, что для сосны, ели и березы коэффициент детерминации R^2 составил соответственно: 0,45; 0,55 и 0,42 по модели (1), 0,15; 0,31 и 0,36 по модели (2) и 0,44; 0,54 и 0,44 по модели (3). Модели (1), (2) и (3) по совокупности данных трех древесных видов показали значения R^2 соответственно 0,42; 0,20 и 0,41 [28]. Очевидно, что диаметр кроны обеспечивал существенно меньший вклад в объяснение изменчивости возраста дерева при сравнении с его высотой, и, судя по коэффициентам детерминации, дополнительное его включение в модели (1) практически не повысило адекватность моделей (3).

Цель нашего исследования состояла в построении моделей зависимости возраста деревьев и древостоев от их основных морфометрических показателей, доступных для лидарного сканирования, на уровне лесообразующих родов Евразии.

Материалы и методы исследования

Исходными данными для исследования послужили материалы последних дополненных версий баз данных о структуре фитомассы деревьев [7] и древостоев [8] лесообразующих видов Евразии. Регрессионный анализ выполнен на уровне родов (подродов), видовой состав которых был показан ранее [9]. Анализ на уровне родов дает возможность использовать полученные модели для тех видов в пределах рода, фактические данные о которых пока отсутствуют.

Поскольку эмпирические модели применимы лишь в фактических диапазонах изменчивости анализируемых переменных, представление о диапазонах применимости моделей дает характеристика исходных данных (табл. 1).

В соответствии с поставленной целью исследования, анализ фактических данных (табл. 1) выполнен с использованием двух структур аллометрических моделей.

Первая модель: $\ln A = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D_c + a_3 (\ln H) \times (\ln D_c), \quad (4)$

где: $(\ln H) \times (\ln D_c)$ – комбинированная переменная, характеризующая совместное действие независимых переменных [1, 3]. Структура оценочной модели для возраста древостоя принята по аналогии с моделью для оценки среднего диаметра древостоя, реализованной в насаждениях Японии [44].

Вторая модель: $\ln A_m = a_0 + a_1 \ln H_m + a_2 \ln N. \quad (5)$

Табл. 1

Характеристика фактических данных о 5320 деревьях и 5817 древостоях, использованных в последующем регрессионном анализе

Род (подрод)	Число наблюдений	Диапазоны исходных значений анализируемых показателей деревьев			Число наблюдений	Диапазоны исходных значений анализируемых показателей древостоев		
		A	H	D_c		A_m	H_m	N
<i>Pinus</i> L.	2170	3–430	1,4–36,6	0,1–13,9	2360	3–380	1,4–38,3	0,1–120,0
<i>Picea</i> L.	750	10–250	1,4–36,3	0,3–8,6	664	7–350	1,6–38,6	0,2–187,5
<i>Abies</i> Mill.	280	8–230	2,2–32,7	0,6–8,9	260	5–280	2,2–45,0	0,1–96,0
<i>Larix</i> Mill.	130	11–420	1,4–34,0	0,3–13,0	464	10–380	1,8–40,0	0,1–122,5
<i>Haploxyton</i> Pilg.	90	7–230	1,7–26,8	0,8–7,7	146	7–380	1,5–31,0	0,1–16,2
<i>Betula</i> L.	715	6–130	1,5–27,1	0,3–13,4	480	6–240	1,5–30,3	0,1–304,0
<i>Populus</i> L.	270	6–75	2,1–28,8	0,4–11,0	252	6–220	1,7–31,0	0,2–131,4
<i>Alnus</i> Gaertn.	400	6–95	4,2–27,8	0,5–8,4	165	6–93	2,7–30,0	0,2–96,2
<i>Tilia</i> L.	120	13–115	7,5–23,8	0,5–9,2	258	11–150	1,7–29,6	0,1–115,0
<i>Quercus</i> L.	370	6–183	2,2–32,6	0,6–15,5	468	6–280	1,8–34,1	0,1–41,2
<i>Fagus</i> L.	235	8–230	2,2–28,8	0,7–12,3	208	8–400	1,7–39,0	0,1–51,8
<i>Carpinus</i> L.	85	6–90	2,5–24,5	0,5–6,1	40	6–90	3,4–23,4	0,4–13,5
<i>Fraxinus</i> L.	75	7–120	2,5–36,0	0,6–10,4	52	7–215	3,1–35,0	0,2–52,7

* **Примечание:** A и A_m – возраст дерева и древостоя, лет; H и H_m – высота дерева и средняя высота древостоя, м; D_c – диаметр кроны дерева, м; N – число деревьев на 1 га, тыс. экз. Подрод *Pinus* представлен двухвойными соснами, подрод *Haploxyton* – пятихвойными соснами.

Результаты и их обсуждение

Модель (4) на уровне дерева

Результаты расчета модели (4) даны в табл. 2. Согласно результатам расчета модели (4), связь возраста дерева с его высотой и диаметром кроны характеризуется для всех родов коэффициентами детерминации от 0,60 до 0,66, за исключением лиственницы, для которой adjR^2 составил 0,39. Все приведенные в табл. 2 регрессионные коэффициенты значимы на уровне вероятности $P < 0,01$. Вклады независимых переменных в объяснение изменчивости возраста деревьев [1, 5] различаются по родам. Вклад высоты дерева варьирует от 42 до 87% (в среднем 71%) и вклад диаметра кроны – от 13 до 58% (в среднем 29%).

Очевидно, что адекватность полученных моделей существенно выше по сравнению с моделями для трех древесных видов Финляндии [28]. Одна из возможных причин повышенной адекватности предложенных моделей может состоять в исходных эмпирических данных, полученных на срубленных модельных деревьях, тогда как в Финляндии были использованы данные растущих деревьев, параметры которых определяются с более высокой ошибкой по сравнению со срубленными модельными деревьями.

Модель (5) на уровне древостоя

Расчет модели (5) показал (табл. 3), что коэффициенты детерминации по 13 родам находятся в пределах

Табл. 2

Результаты регрессионного анализа модели (4)

Род (подрод)	Характеристика модели (4)					
	a_0	a_1	a_2	a_3	adjR^2	SE
<i>Pinus</i>	2,0952	0,6509	-0,7941	0,3001	0,601	0,378
<i>Picea</i>	2,7909	0,2059	–	0,1857	0,667	0,336
<i>Abies,</i>	2,1308	0,6112	–	0,0879	0,656	0,411
<i>Larix</i>	2,9682	0,2755	–	0,1337	0,394	0,508
<i>Haploxyton</i>	2,6877	0,3331	-1,0974	0,6307	0,863	0,291
<i>Betula</i>	1,8218	0,5240	-0,4305	0,2574	0,635	0,352
<i>Populus</i>	1,1902	0,6135	–	0,1200	0,720	0,310
<i>Alnus</i>	0,3653	1,0042	-1,0035	0,4474	0,785	0,274
<i>Tilia</i>	1,3150	0,8894	–	0,0499	0,639	0,178
<i>Quercus</i>	1,3027	0,8567	-0,3547	0,1560	0,848	0,247
<i>Fagus</i>	1,6401	0,6048	-0,5573	0,3016	0,853	0,241
<i>Carpinus</i>	0,7643	0,7733	–	0,2354	0,730	0,385
<i>Fraxinus</i>	0,7219	0,7783	–	0,1867	0,778	0,373

* **Примечание.** Здесь и далее: свободный член моделей a_0 скорректирован на поправку за счет логарифмирования переменных [13]; adjR^2 – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE – стандартная ошибка модели.

Табл. 3

Результаты регрессионного анализа модели (5)

Род (подрод)	Характеристика модели (5)				
	a_0	a_1	a_2	adjR^2	SE
<i>Pinus</i>	2,5582	0,5814	-0,2069	0,652	0,459
<i>Picea</i>	2,8303	0,5293	-0,2927	0,664	0,440
<i>Abies,</i>	2,8236	0,5567	-0,0873	0,617	0,418
<i>Larix</i>	3,9710	0,2038	-0,4326	0,454	0,576
<i>Haploxyton</i>	2,1712	0,9562	–	0,867	0,335
<i>Betula</i>	3,2761	0,2462	-0,3193	0,655	0,399
<i>Populus</i>	1,7981	0,6614	-0,2057	0,653	0,469
<i>Alnus</i>	0,9047	0,9815	-0,1148	0,809	0,262
<i>Tilia</i>	1,0307	1,0926	-0,2209	0,889	0,224
<i>Quercus</i>	2,5069	0,5652	-0,3004	0,742	0,370
<i>Fagus</i>	2,9558	0,4318	-0,2874	0,671	0,378
<i>Carpinus</i>	1,6588	0,8031	-0,3526	0,731	0,348
<i>Fraxinus</i>	1,6709	0,8255	-0,2346	0,838	0,401

от 0,45 до 0,89, что сопоставимо с моделями, описывающими связь возраста древостоев с единственной независимой переменной – их высотой [35, 41, 49, 52]. Регрессионные коэффициенты при независимых переменных значимы на уровне вероятности $P < 0,01$. Исключение составили модели для пихт, где переменная густоты была значимой на уровне $P < 0,05$, и для пятихвойных сосен, где переменная густоты оказалась не значимой на уровне $P < 0,05$ и была исключена из анализа (табл. 3).

Вклады независимых переменных в объяснение изменчивости возраста древостоев, как и возраста деревьев, различаются по родам. Вклад средней высоты древостоя варьирует от 18 до 77% (в среднем 54%) и вклад густоты древостоя – от 23 до 82% (в среднем 46%).

Заключение

По материалам двух авторских баз данных для 13 древесных родов Евразии построены модели зависимости возраста дерева и древостоя от основных морфометрических показателей, доступных для бортового лазерного сканирования.

Аллометрические модели зависимости возраста дерева от его высоты и диаметра кроны характеризуются

коэффициентами детерминации от 0,60 до 0,66, за исключением лиственницы, для которой $\text{adj}R^2$ составил 0,39. Все регрессионные коэффициенты моделей значимы на уровне $P < 0,01$. Вклады независимых переменных в объяснение изменчивости возраста деревьев различаются по родам. Вклад высоты дерева составил в среднем 71% и вклад диаметра кроны – 29%.

Аллометрические модели зависимости возраста древостоев от их высоты и густоты характеризуются коэффициентами детерминации от 0,45 до 0,89, что сопоставимо с ранее опубликованными моделями, описывающими связь возраста древостоев с единственной независимой переменной – их высотой. Регрессионные коэффициенты при независимых переменных для большинства родов значимы на уровне $P < 0,01$. Вклады средней высоты древостоя и его густоты в объяснение изменчивости возраста составляют соответственно 54 и 46%.

Предложенные модели могут быть использованы при оценке возраста деревьев и древостоев лесообразующих родов Евразии с помощью бортовых лидарных технологий, в том числе с применением дронов.

Работа выполнена согласно государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Лиёпа ИЯ. Динамика древесных запасов: прогнозирование и экология. Рига: Зинатне; 1980.
2. Лупян ЕА, Балашов ИВ, Барталев СА и др. Лесные пожары на территории России: особенности пожароопасного сезона 2019 г. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019;16(5):356–63.
3. Мауринь АМ, Лиёпа ИЯ, Дрике АЯ, Поспелова ГЕ. Прогнозирование плодоношения древесных растений. Оптимизация использования и воспроизводства лесов СССР. М.: Наука; 1977. С. 50–3.
4. Никитин КЕ. Лес и математика. Лесное хозяйство. 1965;5:25–9.
5. Розенберг ГС, Долотовский ИМ. Еще раз о показателях силы влияния. Биологические науки. 1988;9: 105–10.
6. Токарева ОС, Алшайби АДА, Пасько ОА. Оценка восстановительной динамики растительного покрова лесных гарей с использованием данных со спутников Landsat. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021;332(7):191–9.

7. Усольцев ВА. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Электронная база данных. 3-е дополненное издание. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет; 2023. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>.
8. Усольцев ВА. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии. Электронная база данных. 4-е дополненное издание. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет; 2023. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>.
9. Цепордей ИС. Биологическая продуктивность лесообразующих видов в климатическом контексте Евразии (под ред. проф. В.А. Усольцева). Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ; 2023. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450>.

Общий список литературы/Referencest

1. Liyepa IYa. Dinamika Drevesnykh Zapasov: Prognozirovaniye i Ekologiya. [Dynamics of Wood Stocks: Forecasting and Ecology]. Riga: Zinatne; 1980. (In Russ.)

2. Lupyan YeA, Balashov IV, Bartalev SA et al. [Forest fires in Russia: features of the fire season 2019]. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2019;16(5):356-63. (In Russ.)
3. Maurin' AM, Liyepa IYa, Drike AY, Pospelova GE. [Forecasting the fruiting of woody plants]. In: *Optimizatsiya Ispolzovaniya i Vosproizvodstva Lesov v SSSR*. [Optimization of the Use and Reproduction of Forests of the USSR]. Moscow: Nauka; 1977. P. 50-3. (In Russ.)
4. Nikitin KE. *Les i Matematika*. [Forest and Mathematics]. *Lesnoye Khoziystvo*. 1965;5:25-9. (In Russ.)
5. Rosenberg GS, Dolotovskiy IM. [Once again on the indicators of the power of influence]. *Biologicheskiiye Nauki*. 1988;9:105-10. (In Russ.)
6. Tokareva OS, Alshaibi ADA, Pas'ko OA. [Assessment of the regenerative dynamics of the vegetation cover of forest burns using data from Landsat satellites]. *Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta. Inzhiniring Georesursov*. 2021;332(7):191-9. (In Russ.)
7. Usoltsev VA. *Fitomassa Model'nykh Dereviyev dlya Distantionnoy i Nazemnoy Taksatsii Lesov Yevrazii*. [Phytomass of Model Trees for Remote and Terrestrial Forest Taxation in Eurasia. An Electronic Database]. Yekaterinburg; 2023a. (In Russ.) Available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451>.
8. Usoltsev VA. *Biomassa i Pervichnaya Produktsiya Lesov Yevrazii*. [Biomass and Primary Production of Eurasian Forests. An electronic database]. Yekaterinburg; 2023. (In Russ.) Available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>.
9. Tsepordey IS. *Biologicheskaya Produktivnost' Lesobrazuyushchikh Vidov v Klimaticheskoy Kontekste Yevrazii*. [Biological Productivity of Forest-Forming Species in the Climatic Context of Eurasia]. Yekaterinburg: Izdatel'stvo UMTs UPI; 2023. (In Russ.) Available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12450>.
10. Aguilar FJ, Rodríguez FA, Aguilar MA et al. Forestry applications of space-borne LiDAR sensors: A worldwide bibliometric analysis. *Sensors*. 2024;24:1106. <https://doi.org/10.3390/s24041106>.
11. Alcaras E, Costantino D, Guastaferro F et al. Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A New index for Sentinel-2 Imagery. *Remote Sens*. 2022;14:1727.
12. Amiro BD, Chen JM. Forest-fire-scars aging using SPOT-VEGETATION for Canadian ecoregions. *Can J Forest Res*. 2003;33:1116-25.
13. Baskerville GL. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can J Forest Res*. 1972;2:49-53.
14. Besnard S, Koirala S, Santoro M et al. Mapping global forest age from forest inventories, biomass and climate data. *Earth Syst Sci Data*. 2021;13:4881-96.
15. Bradford JB, Birdsey RA, Joyce LA et al. Tree age, disturbance history, and carbon stocks and fluxes in subalpine rocky mountain forests. *Glob Chang Biol*. 2010;14:2882-97.
16. Chapin FS III, Matson PA, Vitousek PM. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology* (2nd edition). New York: Springer Science+Business Media; 2011.
17. Chen J, Chen W, Liu J et al. Annual carbon balance of Canada's forests during 1895–1996. *Glob Biogeochem Cycles*. 2000;14:839-49.
18. Chen JM, Ju W, Cihlar J et al. Spatial distribution of carbon sources and sinks in Canada's forests. *Tellus B Chem Phys Meteorol*. 2003;55:622-41.
19. Chen D, Loboda TV, Krylov A et al. Mapping stand age dynamics of the Siberian larch forests from recent Landsat observations. *Remote Sens Environ*. 2016;187:320-31.
20. Dai M, Zhou T, Yang LL et al. Spatial pattern of forest ages in China retrieved from national-level inventory and remote sensing imageries. *Geogr Res*. 2011;30(1):172-84.
21. Diao J, Feng T, Li M et al. Use of vegetation change tracker, spatial analysis, and random forest regression to assess the evolution of plantation stand age in Southeast China. *Ann For Sci*. 2020;77(2):27.
22. Dubayah R, Blair JB, Goetz S et al. The global ecosystem dynamics investigation: high-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Sci Remote Sens*. 2020;1:100002.
23. Farid A, Goodrich DC, Sorooshian S. Using airborne lidar to discern age classes of cottonwood trees in a riparian area. *West J Appl For*. 2006;21(3):149-58.
24. Goulden ML, Mcmillan AMS, Winston GC et al. Patterns of NPP, GPP, respiration, and NEP during boreal forest succession. *Glob Change Biol*. 2011;17(2):855-1.
25. Graves SJ, Marconi S, Stewart D et al. Data science competition for cross-site individual tree species identification from airborne remote sensing data. *PeerJ*. 2023;11:e16578. DOI: 10.7717/peerj.16578.
26. He LM, Chen JM, Pan YD et al. Relationships between net primary productivity and forest stand age in U.S. forests. *Glob Biogeochem Cycles*. 2012;26(3):GB3009.
27. Huang Z, Li X, Du H et al. An algorithm of forest age estimation based on the forest disturbance and recovery detection. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*. 2023;61:4409018.
28. Kalliovirta J, Tokola T. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information. *Silva Fenn*. 2005;39:227-48.
29. Li P, Shang R, Chen JM et al. Evaluation of five models for constructing forest NPP–age relationships in China based on 3121 field survey samples. *Biogeosciences*. 2024;21:625-39.
30. Li P, Li H, Si B et al. Mapping planted forest age using LandTrendr algorithm and Landsat 5–8 on the Loess Plateau, China. *Agric For Meteorol*. 2024;344:109795.

31. Lin X, Shang R, Chen JM et al. High-resolution forest age mapping based on forest height maps derived from GEDI and ICESat-2 space-borne lidar data. *Agric For Meteorol.* 2023;339:109592.
32. Liu X, Su Y, Hu T et al. Neural network guided interpolation for mapping canopy height of China's forests by integrating GEDI and ICESat-2 data. *Remote Sens Environ.* 2022;269:112844.
33. Liu Y, Holm JA, Koven CD et al. Large divergence of projected high latitude vegetation composition and productivity due to functional trait uncertainty. *Earth's Future.* 2024;12:e2024EF004563.
34. Luyssaert S, Schulze ED, Börner A et al. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature.* 2008;455:213-5.
35. Maltamo M, Kinnunen H, Kangas A et al. Predicting stand age in managed forests using National Forest Inventory field data and airborne laser scanning. *Forest Ecosyst.* 2020;7:44.
36. Maltman JC, Hermosilla T, Wulder MA et al. Estimating and mapping forest age across Canada's forested ecosystems. *Remote Sens Environ.* 2023;90:113529.
37. Pan YD, Chen JM, Birdsey R et al. Age structure and disturbance legacy of North American forests. *Biogeosciences.* 2011;8:715-32.
38. Panagiotidis D, Abdollahnejad A, Surový P et al. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *Int J Remote Sens.* 2017;38(8-10):2392-410.
39. Poorter L, Bongers F, Aide TM et al. Biomass resilience of neotropical secondary forests. *Nature.* 2016;530:211-4.
40. Racine EB, Coops NC, St-Onge et al. Estimating forest stand age from LiDAR-derived predictors and nearest neighbor imputation. *Forest Sci.* 2014;60:128-36.
41. Schumacher J, Hauglin M, Astrup R et al. Mapping forest age using national forest inventory, airborne laser scanning, and Sentinel-2 data. *Forest Ecosyst.* 2020;7(1):60.
42. Smolina A, Illarionova S, Shadrin D et al. Forest age estimation in northern Arkhangelsk region based on machine learning pipeline on Sentinel-2 and auxiliary data. *Sci Rep.* 2023;13:22167.
43. Sun C, Cao S, Sanchez-Azofeifa GA. Mapping tropical dry forest age using airborne waveform LiDAR and hyperspectral metrics. *Int J Appl Earth Observ Geoinf.* 2019;83:101908.
44. Umemi K, Inoue A. A model for predicting mean diameter at breast height from mean tree height and stand density. *J Forest Res.* 2024;29(3):186-95.
45. Van Laar A, Akca A. *Forest Mensuration.* Göttingen: Cuvillier Verlag; 1997.
46. Vastaranta M, Niemi M, Wulder MA et al. Forest stand age classification using time series of photogrammetrically derived digital surface models. *Scand J Forest Res.* 2016;31:194-205.
47. Vega C, St-Onge B. Height growth reconstruction of a boreal forest canopy over a period of 58 years using a combination of photogrammetric and lidar models. *Remote Sens Environ.* 2008;112(4):1784-94.
48. Xia J, Xia X, Chen Y et al. Reconstructing long-term forest age of China by combining forest inventories, satellite-based forest age and forest cover data sets. *J Geophys Res Biogeosci.* 2023; 128:e2023JG007492.
49. Yang X, Liu Y, Wu Z et al. Forest age mapping based on multiple-resource remote sensing data. *Environ Monit Assess.* 2020;192:734.
50. Yu G, Chen Z, Piao S et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2014;111:4910-5.
51. Yu Z, Zhao H, Liu S et al. Mapping forest type and age in China's plantations. *Sci Total Environ.* 2020;744:140790.
52. Zhang C, Ju W, Chen JM et al. Mapping forest stand age in China using remotely sensed forest height and observation data. *J Geophys Res Biogeosci.* 2014;119:1163-79.
53. Zhang Y, Yao Y, Wang X et al. Mapping spatial distribution of forest age in China. *Earth Space Sci.* 2017;4:108-16.