

УДК 630*52:630*174.754

МОДЕЛИ ФИТОМАССЫ ДЕРЕВЬЕВ БЕРЕЗЫ И ОСИНЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В КЛИМАТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТАХ ЕВРАЗИИ¹

© 2022 г. В. А. Усольцев^{a, b, *}, И. С. Цепордей^a, И. М. Данилин^c

^aБотанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202а, Екатеринбург, 620144 Россия

^bУральский государственный лесотехнический университет,
ул. Сибирский тракт, д. 37, Екатеринбург, 620100 Россия

^cИнститут леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук,
Академгородок, 50, Красноярск, 660036 Россия

*E-mail: Usoltsev50@mail.ru

Поступила в редакцию 04.10.2021 г.

После доработки 30.12.2021 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

Лесные экосистемы играют большую роль в стабилизации климата, и непрерывный мониторинг их фитомассы имеет первостепенное значение. Технология бортового лазерного сканирования получила широкое распространение при оценке фитомассы деревьев путем дистанционной регистрации таких таксационных показателей, как диаметр и площадь проекции кроны и высота дерева. В работе использована авторская база данных 755 и 296 модельных деревьев соответственно березы (*Betula* spp.) и осины (*Populus* spp.) Евразии с замеренными показателями высоты дерева и диаметра кроны, а также фитомассы ствола, листвы, ветвей и корней. Для всех компонентов фитомассы выявлена положительная связь с диаметром кроны и высотой дерева. На статистически достоверном уровне установлено, что фитомасса листвы, ветвей, стволов и надземная у деревьев березы соответственно на 4.7, 1.3, 9.6 и 8.0% больше, чем у осины, при равных значениях как диаметра кроны, так и высоты дерева. Это вызвано тем, что при одной и той же высоте дерева диаметр кроны у осины на 12% больше, чем у березы. Фитомасса всех компонентов равновеликих деревьев описывается пропеллеро-образной 3D-зависимостью от зимних температур и осадков. В теплых регионах при повышении осадков фитомасса увеличивается, но по мере перехода к холодным регионам она характеризуется противоположным трендом. При повышении температуры во влажных регионах фитомасса возрастает, но по мере перехода в сухие условия снижается. Вклад таксационных показателей деревьев, их видовой принадлежности и климатических переменных в объяснение изменчивости компонентов фитомассы составляет соответственно 79.0, 4.6 и 16.4%. Климатические переменные в наибольшей степени объясняют изменчивость фитомассы стволов, ветвей и надземной (от 18 до 22%) и в наименьшей степени – листвы (около 7%). Полученные результаты могут быть полезны при лазерном мониторинге фитомассы лесов и при прогнозировании возможных изменений в структуре фитомассы деревьев при климатических отклонениях.

Ключевые слова: компоненты фитомассы, лазерное зондирование деревьев, аллометрические модели, диаметр кроны, высота дерева, средняя температура января, годовые осадки.

DOI: 10.31857/S0024114822050072

Антропогенные изменения окружающей среды влияют на экосистемы на всех уровнях организации (Díaz et al., 2019). В функциональной биогеографии предполагается, что свойства растений отражают адаптацию растительности к изменяющимся условиям окружающей среды, в том числе климата (Reichstein et al., 2014). Современные глобальные модели растительности нацелены на реализацию адаптивных реакций расте-

ний в контексте теории оптимальности (Корзухин, Семевский, 1992). Поскольку реакция растений на стрессы проявляется в изменении их фитомассы, представляет интерес знание того, как изменения климата повлияют на фитомассу и способность лесов депонировать углерод (Franklin et al., 2020; Tautenhahn et al., 2020).

В течение последних двух десятилетий для оценки наземной фитомассы интенсивно используется технология бортового лазерного зондирования, обеспечивающая получение высоко-

¹ Работа выполнена в рамках Госзадания FEUZ-2021-0014.

точной информации о пространственных и темпоральных характеристиках лесов. Благодаря способности проникновения сквозь толщу полога, данные лазерного зондирования, представляющие трехмерные облака точек, дают подробную 3D-картину структуры леса (Данилин и др., 2005; Ковязин и др., 2020; Camarretta et al., 2021).

В ходе исследований по Международной биологической программе для трех климатических зон Сибири были предложены зависимости фитомассы крон сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) от ширины кроны (Поздняков et al., 1969). За последние годы достигнуты существенные успехи в области обнаружения отдельных деревьев и регистрации их формы и структуры (диаметр кроны, высота дерева, площадь проекции и объем кроны) на основе новых высокопроизводительных алгоритмов и применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, или дронов) (Ковязин и др., 2016; Усольцев, 2016). При этом диаметр кроны может обладать большей способностью объяснять изменчивость надземной фитомассы (10.5%) по сравнению с высотой дерева (6.0%) (Goodman et al., 2014).

Для нескольких видов лиственницы Китая (лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), лиственницы Гмелина (*L. gmelinii* (Rupr.) Rupr.), лиственницы ольгинской (*L. olgensis* A. Henry), лиственницы тонкочешуйной (*L. kaempferi* (Lamb.) Carr.), лиственницы принца Рупрехта (*L. principisrupprechtii* Mayr.), лиственницы Мастерса (*L. mastersiana* Rehder & E.H. Wilson), лиственницы Потанина (*L. himalaica* W.C. Cheng et L.K. Fu) и лиственницы Гриффитца (*L. speciosa* W.C. Cheng & Y.W. Law)) были проанализированы аллометрические модели связи надземной и подземной фитомассы деревьев с диаметром ствола, а также с диаметром ствола и высотой дерева. Включение в аллометрические модели климатических показателей в качестве дополнительных независимых переменных существенно улучшило точность оценок и дало возможность прогнозирования фитомассы при изменении климата (Zeng et al., 2017; Fu et al., 2017). Однако такие модели разработаны без деления надземной фитомассы на компоненты и применимы лишь для территории Китая.

Березовые и осиновые леса повсеместно распространены в бореальной зоне и часто произрастают совместно с преобладанием того или другого вида. Береза и осина предпочитают разные экологические ниши, которые часто перекрываются. Работ, посвященных изучению растительности этих формаций, сравнительно немного (Дегтева и др., 2001; Попов, 2017). Лесостепная зона Западной Сибири представлена смешанными березово-осиновыми древостоями, в 90% площади которых преобладает береза и в 10% площади преобладает осина (Грибанов и др., 1970). Эти

леса имеют характер небольших островков (колков) площадью от 0.2 до 30 га, которые занимают плоские блюдцеобразные впадины, сформировавшиеся вследствие оседания грунта под влиянием выщелачивания. По опушкам таких “блюдец” растет обычно береза повислая (*Betula pendula* Roth), которая ближе к центру сменяется березой пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), а центр “блюдца”, часто подверженный весеннему застою, часто подверженному увлажнению, бывает занят осиной (Усольцев, 1985). В последние годы происходит гибель колков на территории Западной Сибири вследствие переувлажнения (Володченкова, Гуц, 2011). Это явление циклически повторяется каждые 30–40 лет, но масштабы нынешней гибели колков беспрецедентны (Перепечина, 2009). Являются ли причины нынешней гибели колков антропогенными или климатическими и какое влияние это окажет на соотношение березы и осины в регионе, пока неизвестно.

В субарктическом регионе Швеции в течение последних десятилетий отмечена интенсивная экспансия осины обыкновенной (*Populus tremula* L.) в экотоне, в котором в течение последних 4 тыс. лет доминировала береза Черепанова (*Betula pubescens* Ehrh. ssp. *czerepanovii* (Orlova) Hämet-Ahti). В экспансии осины решающее значение имело поражение березы в результате вспышек травяной моли, вредоносному влиянию которой осина не подвержена. Предполагается, что при дальнейшем потеплении экспансия осины в субарктический экотон продолжится (Van Bogaert et al., 2009; 2010). При прогнозировании устойчивости и продуктивности популяций березы и осины в связи с изменением климата необходимо знать реакцию этих видов на стрессы, выраженную в том числе изменением структуры их фитомассы.

В данном исследовании мы намерены:

- 1) установить, имеются ли статистически значимые различия фитомассы деревьев березы и осины при оценке ее с помощью бортовой лидарной техники;
- 2) выяснить, как компоненты фитомассы соотносятся не только с таксационными показателями деревьев, но и с колебаниями температур и осадков на территории Евразии;
- 3) какой вклад в объяснение изменчивости компонентов фитомассы вносят таксационные показатели деревьев, видовая принадлежность и климатические переменные.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Для решения поставленных задач мы использовали авторскую базу эмпирических данных о фитомассе лесообразующих пород Евразии (Усольцев, 2016). Из нее отобрано 755 и 296 модельных деревьев соответственно березы и осины с заме-

Таблица 1. Статистики модельных деревьев березы и осины

Обозначение статистик*	Анализируемые показатели**								
	h	l_{cr}	d_{cr}	P_s	P_b	P_f	P_a	P_r	P_r/P_a
<i>Betula</i>									
Mean	15.6	7.2	2.9	98.6	16.2	2.5	117.3	47.6	0.35
Min	1.50	0.70	0.30	0.02	0.003	0.004	0.03	0.06	0.24
Max	27.8	18.1	13.4	984.8	267.2	29.5	1279.1	458.8	0.5
SD	6.4	3.2	1.9	130.6	29.8	3.5	159.7	105.0	0.066
CV, %	40.7	44.8	64.7	132.4	183.7	142.5	136.2	220.5	18.9
n	747.0	720.0	755.0	755.0	755.0	755.0	755.0	20.0	20.0
<i>Populus</i>									
Mean	15.4	6.3	3.1	102.3	22.4	3.5	128.2	18.3	0.19
Min	2.10	0.70	0.40	0.10	0.001	0.001	0.12	4.60	0.17
Max	28.8	15.0	11.0	955.0	354.4	38.6	1091.1	31.9	0.22
SD	6.6	2.9	1.9	161.9	48.9	6.0	210.6	19.3	0.037
CV, %	43.1	47.0	59.9	158.2	218.2	170.9	164.2	105.8	19.5
n	296.0	295.0	296.0	296.0	296.0	296.0	296.0	2.0	2.0

* Mean, Min и Max – соответственно среднее, минимальное и максимальное значения; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; n – число наблюдений.

** h – высота дерева, м; l_{cr} – длина кроны, м; d_{cr} – диаметр кроны, м; P_s, P_b, P_f, P_a, P_r – соответственно фитомасса ствола в коре, ветвей, листы, надземной и корней в абсолютно сухом состоянии, кг.

ренными таксационными и биопродукционными показателями (табл. 1). Род Береза представлен в основном видами березы пушистой и березы повислой и в меньшей мере видами березы даурской (*B. dahurica* Pall.), березы ребристой (*B. costata* Trautv.), березы плосколистной (*B. platyphylla* Suk.). Род Осина представлен в основном видом осины обыкновенной и в меньшей мере видом тополя Давида (*P. davidiana* Dode). Обработка экспериментального материала выполнена по программе многофакторного регрессионного анализа Statgraphics-19 (<http://www.statgraphics.com/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что наиболее информативными независимыми переменными при оценке фитомассы деревьев путем дистанционного зондирования являются диаметр кроны и высота дерева. Принята структура двухфакторной аллометрической модели (Вейсов, Каплин, 1976; Усольцев, 2016):

$$\ln P_i = a_0 + a_1 (\ln d_{cr}) + a_2 (\ln h) + a_3 X. \quad (1)$$

С целью установить различие березы и осины по фитомассе деревьев (или его отсутствие), в модели (1) в качестве дополнительной независимой переменной введена бинарная переменная X (Freese, 1964), которой кодируются данные по березе ($X = 0$) и осине ($X = 1$). Результаты расчета моделей (1) показаны в табл. 2.

Бинарная переменная X в моделях (1) значима на уровне $p < 0.001$, за исключением массы листы, для которой X значима на уровне $p < 0.01$. Она имеет знак “минус”, и это означает, что при одних и тех же значениях высоты дерева и диаметра кроны фитомасса всех надземных компонентов у осины существенно меньше, чем у березы, хотя по средним значениям экспериментальных данных фитомасса всех компонентов мы видим прямо противоположное соотношение (табл. 1).

По-видимому, в совокупности всех видов в пределах рода береза по сравнению с осиной имеет более узкую крону, а поскольку мы сравниваем

Таблица 2. Результаты расчета уравнений (1)

	Зависимые переменные			
	$\ln P_s$	$\ln P_f$	$\ln P_b$	$\ln P_a$
a_0^*	-4.5670	-4.2515	-5.0581	-4.0208
$\ln d_{cr}$	0.7309	1.3048	1.5607	0.8483
$\ln h$	2.8299	1.2989	2.0257	2.6547
X	-0.1816	-0.1194	-0.1807	-0.1762
$adjR^2$	0.950	0.770	0.859	0.943
SE	0.41	0.76	0.76	0.43

* Свободный член здесь и далее скорректирован на логарифмическое преобразование (Madgwick, 1983); $adjR^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE – стандартная ошибка уравнения.

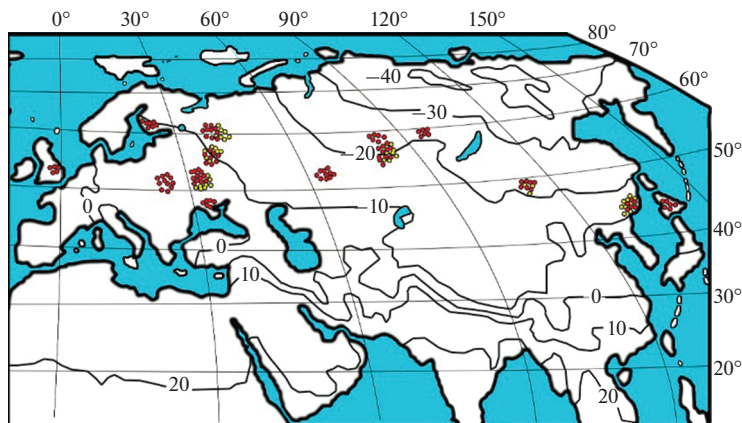


Рис. 1. Распределение данных о фитомассе 755 модельных деревьев березы (красные кружки) и 296 деревьев осины (желтые кружки) на карте изотерм января, °C (World Weather Maps, 2007).

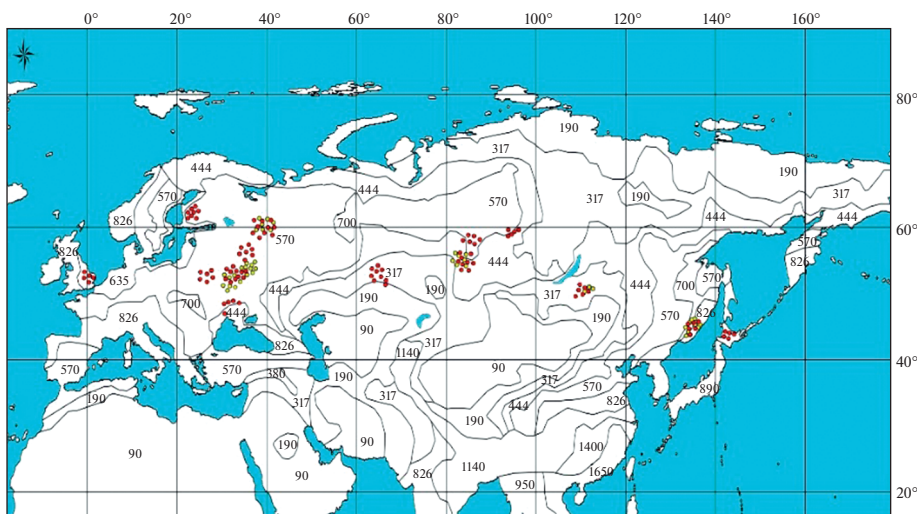


Рис. 2. Распределение данных о фитомассе 755 модельных деревьев березы (красные кружки) и 296 деревьев осины (желтые кружки) на карте среднегодовых осадков, мм (World Weather Maps, 2007).

их при равенстве как высоты дерева, так и диаметра кроны, то у деревьев березы концентрация фитомассы оказывается большей. Это предположение подтвердилось после расчета уравнения связи диаметра кроны с высотой дерева для берез и осин:

$$\ln d_{cr} = -1.4970 + 0.9359(\ln h) + 0.1136X; \quad (2)$$

$$adjR^2 = 0.522; SE = 0.45.$$

Оказалось, что при одинаковой высоте дерева диаметр кроны у осины на 12% больше, чем у березы, и это различие статистически значимо ($t = 3.7 > t_{999} = 3.29$).

Для ответа на второй вопрос нашего исследования имеющиеся данные географических координат модельных деревьев нанесены на карты средней январской температуры (<https://store.mapsofworld.com/>

<http://www.mapmost.com/world-precipitation-map/free-world-precipitation-map/>) (World Weather Maps, 2007) (рис. 1 и 2) и одновременно совмещены с таксационными и биопродукционными показателями деревьев в одной общей матрице, которая включена затем в процедуру регрессионного анализа (<http://www.statgraphics.com/>). Построение моделей фитомассы деревьев на уровне родов, а не видов, а также отказ от использования средней годовой температуры в пользу средней температуры января обоснованы ранее (Усольцев, Цепордей, 2021a).

Предложена структура модели, включающая в качестве независимых переменных как морфометрические характеристики деревьев, так и климатические показатели:

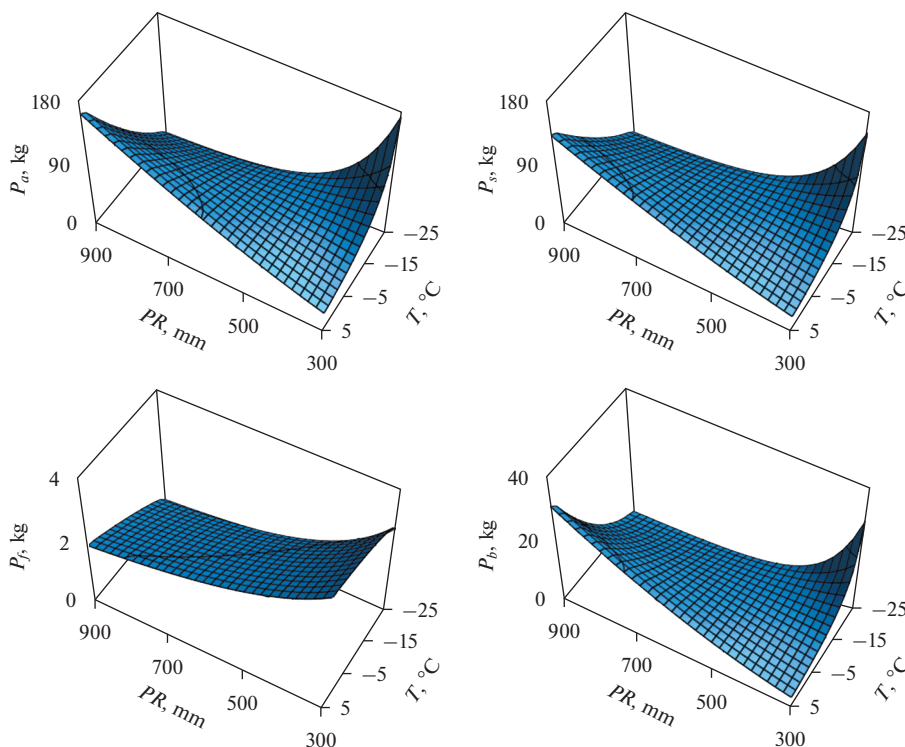


Рис. 3. Связь компонентов фитомассы деревьев березы с средней температурой января (T) и среднегодовыми осадками (PR). Обозначения см. в табл. 1.

$$\ln P_i = a_0 + a_1 (\ln d_{cr}) + a_2 (\ln h) + a_3 X + a_4 [\ln(T + 30)] + a_5 (\ln PR) + a_6 [\ln(T + 30)](\ln PR), \quad (3)$$

где T – средняя температура января, °C; PR – среднегодовые осадки, мм; $[\ln(T + 30)](\ln PR)$ – комбинированная переменная, характеризующая совместное действие температур и осадков. Поскольку средняя температура января в высоких широтах имеет отрицательную величину, для ее логарифмирования в модели (3) она приведена к виду $(T + 30)$.

Как следует из табл. 1, количество фактических данных о фитомассе корней березы и осины

соответственно в 38 и 150 раз меньше по сравнению с данными о надземной фитомассе, и это объясняется несопоставимо большей трудоемкостью получения фактических данных о фитомассе корней. По причине недостаточной представленности данных о фитомассе корней, мы рассчитали модели (3) для относительного показателя, а именно – для P_r/P_a , и связали оба вида в одной общей модели путем кодирования их бинарной переменной X . Результаты расчета моделей (3) показаны в табл. 3.

Все регрессионные коэффициенты моделей, представленных в табл. 3, достоверны на уровне $p < 0.001$, за исключением двух, помеченных как

Таблица 3. Результаты расчета моделей (3)

$\ln(Y)$	a_0	$\ln d_{cr}$	$\ln h$	X	$\ln(T + 30)$	$\ln PR$	$[\ln(T + 30)] \times (\ln PR)$	$adjR^2$	SE
$\ln(P_s)$	32.8198	0.7613	2.8258	-0.1869	-13.1784	-6.1190	2.1487	0.954	0.40
$\ln(P_j)$	9.0958	1.3389	1.3102	-0.1055	-2.5647(*)	-2.3434(*)	0.4775(*)	0.776	0.75
$\ln(P_b)$	45.9217	1.6241	2.0017	-0.1972	-17.6957	-8.4270	2.9153	0.865	0.75
$\ln(P_a)$	33.5231	0.8848	2.6453	-0.1843	-13.1757	-6.1667	2.1562	0.947	0.42
$\ln(P_r/P_a)$	31.5608	—	—	—	-13.0107	-5.1040	2.0173	0.336	0.20

(*) Регрессионные коэффициенты незначимы на уровне $p < 0.05$.

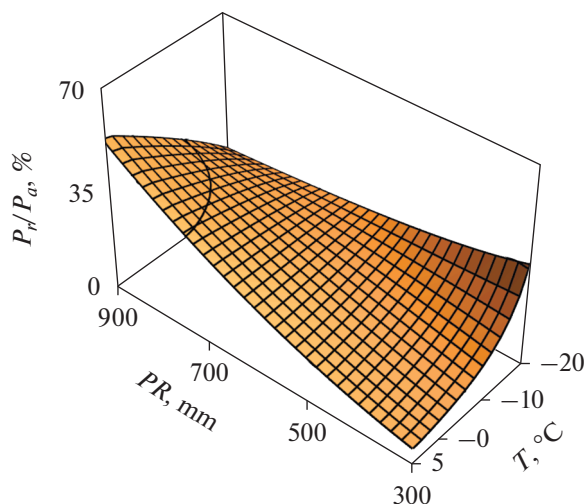


Рис. 4. Связь относительного показателя фитомассы корневой березы и осины (P_r/P_a) с средней температурой января (T) и среднегодовыми осадками (PR).

(*) для фитомассы листвы. В модели для P_r/P_a оказались значимыми лишь климатические переменные.

Геометрическая интерпретация моделей (3) (рис. 3) для фитомассы березы получена путем подстановки в (3) среднего значения h для березы, равного 15.6 м (табл. 1) и расчетных значений d_{cr} , равных для березы и осины соответственно 2.93 и 3.28 м, рассчитанных по модели (2).

Согласно рис. 3, зависимость всех компонентов фитомассы, за исключением листвы, от температур и осадков описывается пропеллеро-образной 3D-поверхностью. В холодных регионах при повышении осадков фитомасса снижается, но по мере перехода к теплым регионам она характеризуется противоположным трендом. При повышении температуры во влажных регионах фитомасса увеличивается, но по мере перехода в сухие условия — снижается. Масса листвы возрастает по мере перехода от влажных к влагодифи-

цитным регионам, независимо от температурного режима, и несколько снижается в направлении холодных регионов, но только при достаточном влагообеспечении. Для осины рис. 3 повторяется, но 3D-поверхности для фитомассы листвы, ветвей, стволов и надземной сдвинуты вниз по оси ординат согласно моделям (3) соответственно на 4.7, 1.3, 9.6 и 8.0%, и эти сдвиги статистически значимы.

У других древесных видов, в частности, ели (Усольцев, Цепордей, 2021б), закономерности несколько отличаются по некоторым компонентам от представленных на рис. 3. По-видимому, это связано с биологическими свойствами древесных видов и с особенностями распределения ассимилятов дерева в различные его компоненты (Palumets, 1990).

Изменчивость отношения (P_r/P_a) объясняется независимыми переменными в наименьшей степени (34%) по сравнению с компонентами надземной фитомассы (78–95%), и различие (P_r/P_a) для березы и осины недостоверно. Графическая интерпретация этой зависимости показана на рис. 4, в котором мы можем видеть, что отношение P_r/P_a для деревьев березы и осины изменяется в градиентах температур и осадков аналогично изменениям фитомассы стволов, ветвей и надземной.

Результаты многофакторного регрессионного анализа дали ответ на третий вопрос нашего исследования (табл. 4). Мы видим в табл. 4, что средние значения вкладов таксационных показателей деревьев, видовой принадлежности и климатических переменных в объяснение изменчивости компонентов фитомассы составляют соответственно 79.0, 4.6 и 16.4%. Климатические переменные в наибольшей степени объясняют изменчивость фитомассы стволов, ветвей и надземной (от 18 до 22%) и в наименьшей степени — листвы (около 7%).

Поскольку деревья разных древесных пород обладают свойственной им конфигурацией вертикального профиля, эта видовая специфика се-

Таблица 4. Вклад независимых переменных уравнений (3) в объяснение изменчивости зависимых переменных, %

ln(Y)	Независимые переменные							III + IV + V
	ln d_{cr} (I)	ln h (II)	I + II	X	ln(T + 30) (III)	ln PR (IV)	[ln(T + 30)] × × (ln PR) (V)	
ln(P_s)	19.7	57.2	76.9	4.9	6.0	6.1	6.1	18.2
ln(P_f)	50.4	38.5	88.9	4.0	1.7	3.4	2.0	7.1
ln(P_b)	37.4	36.0	73.4	4.6	7.2	7.5	7.3	22.0
ln(P_a)	19.7	57.2	76.9	4.9	6.0	6.1	6.1	18.2
$M \pm \sigma^{(a)}$	31.8 ± 14.9	47.2 ± 11.6	79.0 ± 6.8	4.6 ± 0.4	5.2 ± 2.4	5.8 ± 1.7	5.4 ± 2.3	16.4 ± 6.4

(a) $M \pm \sigma$ — среднее значение \pm стандартное отклонение.

годня успешно распознается с помощью бортовых лазерных сенсоров (Puttonen et al., 2011; Åkerblom et al., 2017).

ВЫВОДЫ

1. На основе авторской базы данных о фитомассе березы и осины Евразии установлено, что масса листвы, ветвей, стволов и надземная у деревьев березы равного диаметра кроны и равной высоты дерева соответственно на 4,7, 1,3, 9,6 и 8,0% больше, чем у осины. Это вызвано тем, что при одной и той же высоте дерева диаметр кроны у осины на 12% больше, чем у березы.

2. Введение в аллометрическую модель температуры и осадков в качестве дополнительных независимых переменных показало, что фитомасса равновеликих деревьев описывается пропеллерообразной 3D-зависимостью. В холодных регионах при повышении осадков фитомасса снижается, но по мере перехода к теплым регионам характеризуется противоположным или нейтральным трендом. При повышении температуры во влажных регионах фитомасса увеличивается, но по мере перехода в сухие условия постепенно снижается.

3. Средние значения вклада таксационных показателей деревьев, их видовой принадлежности и климатических переменных в объяснение изменчивости компонентов фитомассы составляют соответственно 79,0, 4,6 и 16,4%.

Полученные результаты могут быть полезны при мониторинге фитомассы лесов на основе лазерного зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вейсов С., Каплин В.Г. К методике определения надземной фитомассы белого саксаула в Восточных Каракумах // Проблемы освоения пустынь. 1976. № 1. С. 60–64.
- Володченкова Л.А., Гуц А.К. Математическое моделирование стадий вымокания березовых лесов с помощью теории катастроф // Математические структуры и моделирование. 2011. № 24. С. 19–33.
- Грибанов Л.Н., Лагов И.А., Чабан П.С. Леса Казахстана // Леса СССР. Т. 5. М.: Наука, 1970. С. 5–77.
- Данилин И.М., Медведев Е.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса: учебное пособие. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 2005. 182 с.
- Детева С.В., Железнова Г.В., Пыстина Т.Н., Шубина Т.П. Ценогическая и флористическая структура лиственных лесов европейского Севера. СПб.: Наука, 2001. 269 с.
- Ковязин В.Ф., Богданов В.Л., Гарманов В.В., Осипов А.Г. Мониторинг зеленых насаждений с применением беспилотных летательных аппаратов // Аграрный научный журнал. Естественные, технические и экономические науки. 2016. № 4. С. 14–19.
- Ковязин В.Ф., Виноградов К.П., Киценко А.А., Васильева Е.А. Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев // Известия вузов. Лесной журн. 2020. № 6. С. 42–54.
- Перепечина Ю.И. Влияние периодического переувлажнения на состояние лесов Курганской области // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2009. Т. 23. С. 54–56. <https://www.elibrary.ru/contents.asp?issueid=1357980>
- Поздняков Л.К., Протопопов В.В., Горбатенко В.М. Биологическая продуктивность лесов Средней Сибири и Якутии. Красноярск: Книжное изд-во, 1969. 120 с.
- Попов С.Ю. Растительность березовых и осиновых лесов Пинежского заповедника // Заповедная наука. 2017. Т. 2. № 2. С. 66–83.
- Усольцев В.А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1985. 191 с. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353>
- Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2016. 336 с. <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>
- Усольцев В.А., Цепордей И.С. Прогнозирование биомассы стволов сосновых деревьев естественных древостоев и лесных культур в связи с изменением климата // Сибирский лесной журн. 2021 а. № 2. С. 72–81.
- Усольцев В.А., Цепордей И.С. Принцип пространственно-временного замещения в экологии и прогнозирование биомассы *Picea* spp. при изменении климата // Хвойные бореальной зоны. 2021 б. Т. 39. № 4. С. 269–275.
- Åkerblom M., Raunonen P., Mäkipää R., Kaasalainen M. Automatic tree species recognition with quantitative structure models // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 191. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.002>
- Camarretta N., Harrison P.A., Lucieer A., Potts B.M., Davidson N., Hunt M. Handheld laser scanning detects spatiotemporal differences in the development of structural traits among species in restoration plantings // Remote Sensing. 2021. V. 13. № 9. Article 1706. <https://doi.org/10.3390/rs13091706>
- Díaz S., Settele J., Brondizio E.S., Ngo H.T., Agard J., Arneth A., Balvanera P., Brauman K.A., Butchart S.H.M., Chan K.M.A., Lucas A.G., Ichii K., Liu J., Subramanian S.M., Midgley G.F., Miloslavich P., Molnár Z., Obura D., Pfaff A., Polasky S., Purvis A., Razaque J., Reyers B., Chowdhury R.R., Shin Y.J., Visseren-Hamakers I., Willis K.J., Zayas C.N. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change // Science. 2019. V. 366. Article 1327.
- Franklin O., Harrison S.P., Dewar R., Farrior C.E., Brännström Å., Dieckmann U., Pietsch S., Falster D., Cramer W., Loreau M., Wang H., Mäkelä A., Rebel K.T., Meron E., Schymanski S.J., Rovenskaya E., Stocker B.D., Zaehle S., Manzoni S., van Oijen M., Wright I.J., Ciais P., van Bodegom P.M., Peñuelas J., Hofhansl F., Terrer C., Soudzilovskaia N.A., Midgley G., Prentice I.C. Organizing principles for vegetation dynamics // Nature Plants. 2020. V. 6. P. 444–453.

- Freese F. Linear regression methods for forest research. USDA Forest Service. Res. Paper FPL 17. Madison, 1964. 136 p.
- Fu L., Sun W., Wang G. A climate-sensitive aboveground biomass model for three larch species in northeastern and northern China // *Trees*. 2017. V. 31. P. 557–573.
- Goodman R.C., Phillips O.L., Baker T.R. The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates // *Ecological Applications*. 2014. V. 24. № 4. P. 680–698. <https://doi.org/10.1890/13-0070.1>
- Madgwick H.A.I. Above-ground weight of forest plots – comparison of seven methods of estimation // *New Zealand J. Forestry Science*. 1983. V. 13. P. 100–107.
- Palumets Ya.K. Modeling of the distribution of spruce phytomass // *Soviet Forest Sciences*. 1990. № 3. P. 36–40 (Al-lerton Press, Inc.).
- Puttonen E., Jaakkola A., Litkey P., Hyypä J. Tree classification with fused mobile laser scanning and hyperspectral data // *Sensors*. 2011. V. 11. № 5. P. 5158–5182. <https://doi.org/10.3390/s110505158>
- Reichstein M., Bahn M., Mahecha M.D., Kattge J., Baldocchi D.D. Linking plant and ecosystem functional biogeography // *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*. 2014. V. 111. Article 201216065.
- Tautenhahn S., Migliavacca M., Kattge J. News on intra-specific trait variation, species sorting, and optimality theory for functional biogeography and beyond // *New Phytologist*. 2020. V. 228. P. 6–10.
- Van Bogaert R., Jonasson C., De Dapper M., Callaghan T.V. Range expansion of thermophilic aspen (*Populus tremula* L.) in the Swedish Subarctic // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2010. V. 42. P. 362–375. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-42.3.362>
- Van Bogaert R., Jonasson C., De Dapper M., Callaghan T.V. Competitive interaction between aspen and birch moderated by invertebrate and vertebrate herbivores and climate warming // *Plant Ecology & Diversity*. 2009. V. 2. № 3. P. 221–232. <https://doi.org/10.1080/17550870903487456>
- World Weather Maps, 2007. Available at: <https://www.mapsofworld.com/referrals/weather>
- Zeng W.S., Duo H.R., Lei X.D., Chen X.Y., Wang X.J., Pu Y., Zou W.T. Individual tree biomass equations and growth models sensitive to climate variables for *Larix* spp. in China // *European J. Forest Research*. 2017. V. 136. P. 233–249.

Phytomass Models for Aspen and Birch Trees for Remote Scanning in Climatic Gradients of Eurasia

V. A. Usoltsev^{1, 2, *}, I. S. Tsepordey¹, and I. M. Danilin³

¹Botanical Garden, Ural Branch of the RAS, 8 Marta st., 202a, Yekaterinburg, 620144 Russia

²Ural State Forest Engineering University, Sibirsky tract, 37, Yekaterinburg, 620100 Russia

³Forest Institute, Siberian Branch of the RAS, Akademgorodok 50, bldg. 28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

*E-mail: Usoltsev50@mail.ru

Forest ecosystems play an important role in climate stabilization, and continuous monitoring of their phytomass is of paramount importance. Airborne laser scanning technology has become widespread in assessing the trees phytomass by remote registration of such taxation indicators as the diameter and area of the crown projection and the height of the tree. The work was based on the author's database of 755 and 296 model birch (*Betula* spp.) and aspen (*Populus* spp.) trees within Eurasia, with measured indicators of tree height and crown diameter, as well as phytomass of the trunk, foliage, branches and roots. For all the phytomass components, a positive correlation was found with the crown diameter and tree height. At a statistically significant level, it was found that the phytomass of foliage, branches, trunks, and aerial phytomass in birch trees is respectively 4.7%, 1.3%, 9.6%, and 8.0% larger than in aspen with similar values of both crown diameter and tree height. This is due to the fact that at the same tree height, the crown diameter of aspen is 12% larger than that of birch. The phytomass of all components of equal-sized trees is described by a propeller-shaped 3D dependence on winter temperatures and precipitation. In warm regions, with an increase in precipitation, the phytomass increases, but as it moves to cold regions, it is characterized by an opposite trend. As the temperature rises in humid regions, the phytomass increases, but moving towards dryer conditions, it tends to decrease. The contribution of trees taxation indicators, their species, and climatic variables to the phytomass components' variability is 79.0%, 4.6%, and 16.4%, respectively. Climatic variables explain the variability of trunks, branches, and overall aboveground phytomass to the greatest extent (from 18 to 22%) and to the least extent – the phytomass of foliage (about 7%). The results obtained can be useful in laser monitoring of forest phytomass and in predicting possible changes in the structure of tree phytomass under climatic deviations.

Keywords: biomass components, LiDAR sensing of trees, allometric models, crown diameter, tree height, average January temperature, annual precipitation.

Acknowledgements: The work has been carried out within the framework of the State contract FEUZ-2021-0014.

REFERENCES

- Åkerblom M., Raunonen P., Mäkipää R., Kaasalainen M., Automatic tree species recognition with quantitative structure models, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 191, pp. 1–12.
- Camarretta N., Harrison P.A., Lucieer A., Potts B.M., Davidson N., Hunt M., Handheld laser scanning detects spatiotemporal differences in the development of structural traits among species in restoration plantings, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Article 1706.
- Danilin I.M., Medvedev E.M., Mel'nikov S.R., *Lazernaya lokatsiya Zemli i lesa: uchebnoe posobie* (Laser location of the Earth and forests: a textbook), Krasnoyarsk: Institute of Forests SB RAS, 2005, 182 p.
- Degteva S.V., Zheleznova G.V., Pystina T.N., Shubin T.P., *Tsenoticheskaya i floristicheskaya struktura listvennykh lesov evropeiskogo Severa* (Phytocoenotic and floristic structure of deciduous forests of the European North), St.-Petersburg: Nauka, 2001, 269 p.
- Díaz S., Settle J., Brondizio E.S., Ngo H.T., Agard J., Arneeth A., Balvanera P., Brauman K.A., Butchart S.H.M., Chan K.M.A., Lucas A.G., Ichii K., Liu J., Subramanian S.M., Midgley G.F., Miloslavich P., Molnár Z., Obura D., Pfaff A., Polasky S., Purvis A., Razzaque J., Reyers B., Chowdhury R.R., Shin Y.J., Visseren-Hamakers I., Willis K.J., Zayas C.N., Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change, *Science*, 2019, Vol. 366, Article 1327.
- Franklin O., Harrison S.P., Dewar R., Farris C.E., Brännström Å., Dieckmann U., Pietsch S., Falster D., Cramer W., Loreau M., Wang H., Mäkelä A., Rebel K.T., Meron E., Schymanski S.J., Rovenskaya E., Stocker B.D., Zaehle S., Manzoni S., van Oijen M., Wright I.J., Ciais P., van Bodegom P.M., Peñuelas J., Hofhansl F., Terrer C., Soudzilovskaia N.A., Midgley G., Prentice I.C., Organizing principles for vegetation dynamics, *Nature Plants*, 2020, Vol. 6, pp. 444–453.
- Freese F., Linear regression methods for forest research, *USDA Forest Service. Res. Paper FPL 17*, Madison, 1964, 136 p.
- Fu L., Sun W., Wang G., A climate-sensitive aboveground biomass model for three larch species in northeastern and northern China, *Trees*, 2017, Vol. 31, pp. 557–573.
- Goodman R.C., Phillips O.L., Baker T.R., The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates, *Ecological Applications*, 2014, Vol. 24, No. 4, pp. 680–698.
- Gribanov L.N., Lagov I.A., Chaban P.S., Lesa Kazakhstana (Forests of Kazakhstan). In: *Lesa SSSR* (Forests of the USSR), Moscow, Nauka, Vol. 5, 1970, pp. 5–77.
- Korzukhin M.D., Semevsky F.N., *Sinekologiya lesa* (Synecology of the forest), St.-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 192 p.
- Kovyazin V.F., Bogdanov V.L., Garmanov V.V., Osipov A.G., Monitoring zelenykh nasazhdenij s primeneniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov (Monitoring of green forests using unmanned aerial vehicles), *Agrarnyj nauchnyj Zhurnal. Estestvennye, tekhnicheskie i ekonomicheskie nauki*, 2016, No. 4, pp. 14–19.
- Kovyazin V.F., Vinogradov K.P., Kitsenko A.A., Vasil'eva E.A., Vozdushnoe lazernoe skanirovanie dlya utocneniya taksatsionnykh kharakteristik drevostoev (Aerial laser scanning to clarify the taxation characteristics of stands), *Lesnoi zhurnal, Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*, 2020, No. 6, pp. 42–54.
- Madgwick H.A.I., Above-ground weight of forest plots – comparison of seven methods of estimation, *New Zealand J. Forestry Science*, 1983, Vol. 13, pp. 100–107.
- Palumets Ya.K., Modeling of the distribution of spruce phytomass, *Soviet Forest Sciences*, 1990, No. 3, pp. 36–40 (Allerton Press, Inc.).
- Perepechina Yu. I., Vliyanie periodicheskogo pereuvlazhneniya na sostoyanie lesov Kurganskoy oblasti (The influence of periodic overwetting on the condition of the forests of the Kurgan region), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2009, Vol. 23, pp. 54–56, available at: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?issueid=1357980>
- Popov S.Yu., Rastitel'nost' berezovykh i osinovykh lesov Pinezhskogo zapovednika (Vegetation of birch and aspen forests in the Pinega State Reserve), *Nature Conservation Research. Zapovednaya Nauka*, 2017, No. 2, pp. 66–83. DOI 10.24189/ncr.2017.015
- Pozdnyakov L.K., Protopopov V.V., Gorbatenko V.M., *Biologicheskaya produktivnost' lesov Sredney Sibiri i Yakutii* (Biological productivity of forests in Middle Siberia and Yakutia), Krasnoyarsk, Knizhnoe Izdatelstvo, 1969, 120 p.
- Puttonen E., Jaakkola A., Litkey P., Hyypää J., Tree classification with fused mobile laser scanning and hyperspectral data, *Sensors*, 2011, Vol. 11, No. 5, pp. 5158–5182.
- Reichstein M., Bahn M., Mahecha M.D., Kattge J., Baldocchi D.D., Linking plant and ecosystem functional biogeography, *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 2014, Vol. 111, Article 201216065.
- Tautenhahn S., Migliavacca M., Kattge J., News on intra-specific trait variation, species sorting, and optimality theory for functional biogeography and beyond, *New Phytologist*, 2020, Vol. 228, pp. 6–10.
- Usoltsev V.A., *Fitomassa model'nykh derev'ev lessobrazuyushchikh porod Evrazii: baza davnykh, klimaticheskii obuslovlennaya geografiya, taksatsionnye normativy* (Single-tree biomass of forest-forming species in Eurasia: database, climate-related geography, weight tables), Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2016, 336 p., available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/5696>
- Usoltsev V.A., *Modelirovanie struktury i dinamiki fitomassy drevostoev* (Modeling of the structure and dynamics of the phytomass of forest stands), Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyarskogo un-ta, 1985, 191 p., available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353>
- Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Printsip prostranstvenno-vremennogo zameshcheniya v ekologii i prognozirovanie biomassy *Picea* spp. pri izmenenii klimata (The principle of space-for-time substitution in ecology and the prediction of *Picea* spp. biomass with climate change), *Khvoinye boreal'noi zony*, 2021 6, Vol. 39, No. 4, pp. 269–275.
- Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Prognozirovanie biomassy stvolov sosnovykh derev'ev estestvennykh drevostoev i le-

snykh kul'tur v svyazi s izmeneniem klimata (Predicting stem biomass of pine trees in natural and planted forests due to climate change), *Sibirskij Lesnoj Zhurnal*, 2021a, No. 2, pp. 72–81.

Van Bogaert R., Jonasson C., De Dapper M., Callaghan T.V., Competitive interaction between aspen and birch moderated by invertebrate and vertebrate herbivores and climate warming, *Plant Ecology & Diversity*, 2009, Vol. 2, No. 3, pp. 221–232.

Van Bogaert R., Jonasson C., De Dapper M., Callaghan T.V., Range expansion of thermophilic aspen (*Populus tremula* L.) in the Swedish Subarctic, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2010, Vol. 42, pp. 362–375.

Veyisov S., Kaplin V.G., K metodike opredeleniya nadzemnoy fitomassy belogo saksaula v Vostochnykh Karakumakh

(To the method of biomass estimating in white saxaul (*Haloxylon* Bunge) of the Eastern Kara-Kum desert), In: *Problemy osvoeniya pustyn'* (Problems of desert exploitation), 1976, Vol. 1, pp. 60–64.

Volodchenkova L.A., Guts A.K., Matematicheskoe modelirovanie stadij vymokaniya berezovykh lesov s pomoshchyu teorii katastrof (Mathematical modeling of the stages of overwetting of birch forests using the theory of catastrophes), *Matematicheskie Struktury i Modelirovanie*, 2011, Vol. 24, pp. 19–33.

World Weather Maps, 2007, available at: <https://www.mapsofworld.com/referrals/weather>

Zeng W.S., Duo H.R., Lei X.D., Chen X.Y., Wang X.J., Pu Y., Zou W.T., Individual tree biomass equations and growth models sensitive to climate variables for *Larix* spp. in China, *European J. Forest Research*, 2017, Vol. 136, pp. 233–249.