

УДК 630\*182.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЛЩИНЫ КОРЫ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД<sup>1</sup>

© 2024 г. В. А. Усольцев<sup>а, б, \*</sup>, И. С. Цепордей<sup>а</sup>, А. Ф. Уразова<sup>б</sup>, А. В. Борников<sup>б</sup>, Н. И. Плюха<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202а, Екатеринбург, 620144 Россия

<sup>б</sup>Уральский государственный лесотехнический университет,  
ул. Сибирский тракт, д. 37, Екатеринбург, 620100 Россия

<sup>с</sup>Оренбургский государственный аграрный университет,  
ул. Челюскинцев, д. 8, Оренбург, 460014 Россия

\*E-mail: Usoltsev50@mail.ru

Поступила в редакцию 13.04.2023 г.

После доработки 22.11.2023 г.

Принята к публикации 08.02.2024 г.

Необходимость оценки углерододепонирующей способности древостоя, отдельного дерева и его компонентов постоянно подчеркивается в мировой литературе, так как смягчение последствий изменения климата стало наивысшим приоритетом. Поскольку концентрация углерода различается у разных древесных видов и в разных компонентах дерева, в том числе в стволовой древесине и коре, необходима разработка математических видоспецифичных моделей для расчета доли коры в стволах с целью повышения точности оценок углеродного баланса лесов. Известна связь толщины коры как с возрастом, так и с диаметром ствола дерева, но в отношении ее региональной изменчивости данные противоречивы. По фактическим данным 1100 модельных деревьев пяти лесообразующих видов разработаны аллометрические модели смешанного типа, включающие в качестве независимых переменных возраст и диаметр ствола, а также бинарную переменную, характеризующую влияние района произрастания на толщину коры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), березы повислой (*Betula pendula* Roth), лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* N. Dyl.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* L.), а также различие толщины коры у ели сибирской (*Picea obovata* L.) и пихты сибирской (*Abies sibirica* L.) при их совместном произрастании в спелых древостоях таежной зоны. На статистически значимом уровне установлено, что толщина коры у сосны обыкновенной и березы повислой в зоне степи существенно больше по сравнению с таежной зоной, а толщина коры лиственницы сибирской в лесотундре значительно больше по сравнению с лиственницей Сукачева в зоне степи. Толщина коры у ели сибирской меньше, чем у пихты сибирской. Показано ранжирование видов по толщине коры.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, береза повислая, лиственница Сукачева, лиственница сибирская, пихта сибирская, ель сибирская, толщина коры, аллометрические модели, региональные различия, ранжирование видов.

DOI: 10.31857/S0024114824020039 EDN: RETJAJ

В течение последних десятилетий необходимость оценки фитомассы древостоя, отдельного дерева и его компонентов постоянно подчеркивается на международном уровне, поскольку смягчение последствий изменения климата стало наивысшим мировым приоритетом. В действительности концентрация углерода различна у разных древесных видов и в разных компонентах дерева, особенно в стволовой древесине и коре (Chauhan et al., 2009). Разработка математических моделей для расчета доли коры в стволовой древесине дает возможность повышения точности оценок углеродного баланса лесов (Liepiņš J., Liepiņš K., 2015).

Глобальную изменчивость общей толщины коры традиционно приписывают влиянию лесных пожаров (Дыренков, 1973; Catry et al., 2012; Pausas, 2015; Rosell, 2016). Однако кора многофункциональна, о чем свидетельствует наличие ее внутренних живых и внешних мертвых участков. Основной функцией внутренней коры является транспортировка и хранение ассимилятов и вторичных соединений. Основные функции наружной коры включают снижение потерь воды, защиту от патогенов, механических повреждений и неблагоприятных климатических условий (Evert, Eichhorn, 2006; Pausas, 2015). Многофункциональность коры означает, что, помимо огневой адаптации, на изменение ее толщины влияют и другие факторы. Несмотря на важную биологическую функцию коры,

<sup>1</sup>Работа выполнена по государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

она мало изучена с биоэкологической точки зрения по сравнению с другими компонентами дерева, в частности с листвой и хвоей. В большинстве опубликованных работ по экологии коры подчеркивается ее защитная роль (Vines, 1968; Harmon, 1984; Фурьев В., Фурьев Е., 2008; Рой, Левковская, 2011; Домрачева и др., 2019), и лишь недавно параметры коры стали рассматриваться как ключевые функциональные признаки в структурировании сообществ и биомов (Pausas, 2015). Изучение различных факторов, вызывающих изменение толщины коры, имеет решающее значение для понимания биологии и экологии коры (Rosell, 2016).

Сведения об относительной толщине коры дерева необходимы для отдельной оценки объема древесины и коры. Примечательно, что огромные объемы информации о фитомассе древесных видов Японии получены без разделения ее на древесину и кору (Karizumi, 1974), поскольку японские технологии переработки древесины этого не предусматривают. Тем не менее, данные о запасе стволовой древесины без коры часто необходимы при отводе древостоев в рубку по условиям маркетинга (Воропанов, 1982; Marshall et al., 2006). Доля коры у разных древесных видов варьирует в диапазоне от 5 до 31% от объема ствола (Kunze, 1912; Дитрих, 1970; Sonmez et al., 2007; Lawes et al., 2013; Murphy, Cown, 2015; Шевелев, 2023). Поскольку толщина коры является видоспецифичной, необходимы нормативы для ее оценки по всем древесным видам (Marshall et al., 2006; Williams et al., 2007; Rosell, 2016; Stangle et al., 2017).

Известно, что у большинства видов относительная толщина коры коррелирует с диаметром на высоте груди, возрастом дерева, высотой над уровнем моря, условиями местопроизрастания и сбегом ствола (Захаров, 1956; Гусев, 1981; Пчелинцев, 1987; Philip, 1994; Dr̄ska et al., 2003; Laasasenaho et al., 2005; Евстафьев, 2007; Вайс, 2010; Lawes et al., 2013; Richardson et al., 2015; Rosell, 2016; Грязькин и др., 2019). Положительная связь толщины коры с диаметром ствола у ряда древесных видов была показана А.С. Васильевым (2012) с их ранжированием по степени снижения толщины коры в последовательности: береза, осина, ель и сосна. Связь толщины коры с диаметром ствола у шести видов на юге Африки характеризовалась коэффициентами детерминации от 0.005 до 0.882. Столь большое различие коэффициентов детерминации объясняли особенностями “макроскопической морфологии” коры, в частности анатомией ритидома (корки) (Williams et al., 2005, 2007). Связь толщины коры с диаметром ствола у бука (*Fagus*) в Иране характеризовалась коэффициентом детерминации 0.84 (Mirabdollahi et al., 2011) и у дуба (*Quercus*) в Турции — от 0.69 до 0.73 (Yilmaz, 2021).

В древостоях березы повислой лесостепной зоны в возрастном диапазоне от 30 до 90 лет при

аппроксимации связи толщины коры с возрастом дерева степенной функцией был получен коэффициент детерминации 0.60 при стандартной ошибке 0.74 (Ефремова, Шевелев, 2017). По данным 284 модельных деревьев кедра сибирского, полученным на 17 пробных площадях, выведена линейная зависимость толщины коры от диаметра на высоте груди, объясняющая 64% варьирования толщины коры (Шевелев и др., 2015).

При исследовании сосняков Сибири в возрасте от 25 до 370 лет в диапазоне диаметров ствола на высоте груди от 10 до 87 см были получены положительные парные (однофакторные) зависимости толщины коры от возраста и от диаметра ствола, характеризующиеся низкими коэффициентами детерминации, соответственно 0.139 и 0.357 (Вайс, 2009). Положительные связи толщины коры как с возрастом дерева, так и с диаметром ствола были выявлены в лиственничниках Хакасии, при этом коэффициенты детерминации оказались выше: соответственно 0.268 и 0.585. Двухфакторная степенная модель, включающая оба названных выше фактора в качестве независимых переменных, оказалась статистически значимой на уровне вероятности  $p < 0.999$  с ошибкой  $\pm 0.03$  (Шевелев, Кучеренко, 1989).

При осреднении данных толщины коры сосны калабрийской (*Pinus brutia* Ten.) по семи группам возраста (по 50 деревьев в каждой группе) было получено нелинейное уравнение связи толщины коры с возрастом, характеризующее коэффициентом детерминации 0.96. При аналогичном осреднении значений толщины коры по каждой из семи групп диаметра ствола (по 50 деревьев разного возраста в каждой группе) получено линейное уравнение связи толщины коры с диаметром ствола на высоте груди, характеризующее коэффициентом детерминации 0.97. Когда же в расчет были включены все данные без осреднения, коэффициент детерминации в зависимости толщины коры от диаметра ствола снизился до 0.80 (Kurt et al., 2021).

Из вышеизложенного следует, что при моделировании толщины коры необходимо включать в качестве независимых переменных и возраст дерева, и диаметр ствола. У некоторых видов (пихта, ель) поверхность коры остается относительно гладкой в течение многих лет, однако у многих видов нижняя часть ствола со временем покрывается коркой, изборозжденной глубокими трещинами (сосна, лиственница, береза) (Перелыгин, Уголев, 1971). В таких случаях определение истинной толщины коры становится проблематичным.

При исследовании изменчивости толщины коры была показана ее географическая обусловленность (Valipour et al., 2009; Bonyad et al., 2012; Stangle et al., 2017), не подтвержденная в других исследованиях (Нахабцев, 1990). Анализ зависимости толщины коры от диаметра ствола не выявил существенных ее различий между лесорастительными районами

(Шевелев, 2016). Не удалось обнаружить также влияния климатических факторов на толщину коры ели европейской в Германии (Stangle et al., 2017).

В задачи настоящего исследования входило:

(а) на примере нескольких лесообразующих видов Евразии выявить возможность построения адекватных двухфакторных моделей зависимости толщины коры от возраста дерева и диаметра ствола с оценкой вклада каждой переменной в объяснение изменчивости толщины коры;

(б) проверить достоверность различия названных моделей:

— для сосны обыкновенной и березы между сухой степью и тайгой;

— для лиственницы между сухой степью и лесотундрой;

— для ели и пихты Среднего Урала при их совместном произрастании;

(в) при отсутствии названных различий разработать для каждого вида обобщенные модели зависимости толщины коры от возраста дерева и диаметра ствола, а при наличии различий выполнить ранжирование видов по толщине коры с учетом ее географической обусловленности.

#### Объекты и методика

Исходными данными для исследования послужили материалы замера диаметров в коре и без коры модельных деревьев лесообразующих видов на пробных площадях в процессе получения нами данных о структуре фитомассы деревьев в течение последних десятилетий, с 1983 по 2007 годы (Usoltsev, 2020). У спиленного модельного дерева отмеряли мерной лентой расстояние 1.3 м от шейки корня и выпиливали диск толщиной от 2 до 3 см. В двух взаимно перпендикулярных направлениях измеряли

штангенциркулем диаметр ствола в коре и без коры с точностью 0.1 мм и в дальнейший расчет включали среднее значение односторонней (по радиусу) коры. У толстых деревьев с наличием корки использовали линейку с ценой деления 1 мм, при этом диаметр коры измеряли по внешнему контуру корки, включая в толщину коры пустоты между выступами корки. Это создавало неопределенность в отношении точности измерения толщины коры при наличии трещиноватой корки (Усольцев, 1985). У некоторых древесных видов, например у можжевельника западного (*Juniperus occidentalis* Hook.), продольные трещины пронизывают не только кору, но и древесину. В подобных случаях выпиленный диск покрывали листом оргстекла и сверху папиросной бумагой, на которой рисовали очертания коры и древесины. Затем рисунок вырезали, а площади коры и древесины измеряли с помощью измерителя площади поверхности Lambda Instruments LiCor (Gholz, 1980). Метод позволяет довольно точно определять объем и процент коры, но неопределенность с оценкой ее толщины в некоторой степени сохраняется.

Характеристика модельных деревьев включает диапазоны изменения основных показателей, имеющие первостепенное значение в регрессионном анализе (табл. 1).

Сосна обыкновенная в обоих регионах представлена как естественными древостоями, так и культурами, береза в степи имеет порослевое происхождение (сплошная рубка 102 деревьев) и в южной тайге — семенное, лиственница в степи представлена культурами и в лесотундре — естественными древостоями. Пихта и ель произрастают совместно в спелых древостоях Среднего Урала.

Поскольку одной из задач исследования были региональные сопоставления толщины коры сосны, березы и лиственницы, а также сравнение

**Таблица 1.** Характеристика данных о 1100 модельных деревьях, использованных в последующем регрессионном анализе

| Диапазоны изменения показателей        |        |         |         |        | n   | Диапазоны изменения показателей      |        |         |         |         | n   |
|----------------------------------------|--------|---------|---------|--------|-----|--------------------------------------|--------|---------|---------|---------|-----|
| A                                      | D      | N       | ТК      | ОТК    |     | A                                    | D      | N       | ТК      | ОТК     |     |
| Сосна обыкновенная                     |        |         |         |        |     |                                      |        |         |         |         |     |
| Сухая степь (код 0)                    |        |         |         |        |     | Средняя и южная тайга (код 1)        |        |         |         |         |     |
| 9–110                                  | 0.3–48 | 0.4–82  | 0.04–4  | 1.4–24 | 595 | 10–126                               | 2.6–34 | 0.4–6   | 0.1–2   | 1–8     | 152 |
| Береза повислая                        |        |         |         |        |     |                                      |        |         |         |         |     |
| Сухая степь (код 0)                    |        |         |         |        |     | Южная тайга (код 1)                  |        |         |         |         |     |
| 32–53                                  | 5.5–30 | 0.65    | 0.2–3   | 2–10   | 102 | 31–86                                | 7–26   | 0.4–0.8 | 0.2–1.7 | 2–7     | 56  |
| Лиственница Сукачева                   |        |         |         |        |     | Лиственница сибирская                |        |         |         |         |     |
| Сухая степь (код 0)                    |        |         |         |        |     | Лесотундра (код 1)                   |        |         |         |         |     |
| 26–42                                  | 6–27   | 0.8–1.6 | 0.2–1.3 | 2.3–8  | 28  | 23–380                               | 2–38   | 0.4–11  | 0.1–3.2 | 3–15    | 102 |
| Пихта сибирская, средняя тайга (код 0) |        |         |         |        |     | Ель сибирская, средняя тайга (код 1) |        |         |         |         |     |
| 49–164                                 | 6–34   | 1.1–2   | 0.2–1   | 2–6.3  | 32  | 37–134                               | 6–38   | 1.1–2   | 0.2–1   | 1.3–5.6 | 33  |

Примечание. A — возраст дерева, лет; D — диаметр ствола в коре на высоте груди, см; N — густота деревьев, тыс. экз./га; ТК — толщина коры на высоте груди по радиусу ствола, или односторонняя толщина, см; ОТК — отношение односторонней толщины коры к диаметру ствола в коре, %; n — число наблюдений.

пихты и ели по толщине коры, в основу анализа мы положили модель смешанного типа (Zeng, 2017), включающую в качестве независимых переменных как таксационные характеристики деревьев, так и бинарную переменную (Freese, 1964; Бубырь и др., 2014), кодирующую принадлежность данных одного древесного вида к двум разным регионам или данных двух видов одного региона. В предположении, что относительная толщина коры (ОТК) может быть менее изменчива, чем собственно толщина коры (ТК), выполнен анализ того и другого показателя. Как было отмечено выше, в литературных источниках выведены зависимости толщины коры от возраста или диаметра ствола как нелинейные, так и линейные. Поскольку в природных системах преобладают нелинейные связи, а линейность является лишь частным случаем (Леонтьев, 1966), нами применена степенная зависимость в логарифмической линеаризации с поправкой на ее ретрансформацию (Mascaro et al., 2014).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассчитаны модели, имеющие общий вид:

$$\ln(\text{ТК}) \text{ или } \ln(\text{ОТК}) = a + b_1(\ln A) + b_2(\ln D) + b_3(\ln A) \times (\ln D) + b_4(X), \tag{1}$$

где комбинированная переменная  $\ln A \times \ln D$  характеризует совместное действие возраста дерева и диаметра ствола. Кодирование регионов и древесных видов бинарной переменной ( $X = 0$  или  $X = 1$ ) показано в табл. 1. Константа “а” здесь и далее скорректирована на логарифмическую трансформацию (Baskerville, 1972). Результаты расчета представлены в табл. 2.

Несмотря на то, что сосна, береза и лиственница представлены в сравниваемых регионах древостоев разных диапазонов густоты, а сосна к тому же

как естественными древостоями, так и культурами в обоих регионах, густота, введенная в модель (1) в качестве дополнительной независимой переменной, оказалась во всех случаях статистически незначимой на уровне вероятности  $p < 0.95$ . На этом основании густота древостоя была исключена из структуры модели (1). В модели (1) для пихты и ели возраст дерева оказался статистически незначим на уровне вероятности  $p < 0.95$  и тоже был исключен из расчета. Возможная причина отсутствия значимости возраста у пихты и ели кроется в наличии корреляции возраста дерева и диаметра ствола ( $r = 0.46$ ).

Все регрессионные коэффициенты в модели (1) значимы на уровнях вероятности в диапазоне от  $p < 0.98$  до  $p < 0.999$ . Несмотря на существенно более низкие коэффициенты детерминации модели для ОТК по отношению к модели для ТК, каких-либо различий по уровню значимости регрессионных коэффициентов тех и других не выявлено. Более того, на обозначенных уровнях вероятности в моделях для ТК и ОТК оказались статистически значимыми одни и те же независимые переменные, и предположение о меньшей изменчивости ОТК по отношению к ТК не подтвердилось. Напротив, на статистически значимом уровне были подтверждены региональные различия как ТК, так и ОТК для сосны, березы и лиственницы, а также соответствующие различия между пихтой и елью.

Вклады независимых переменных в объяснение изменчивости зависимых переменных показаны в табл. 3. Оказалось, что у сосны и лиственницы вклады возраста, диаметра ствола и бинарной переменной в объяснение изменчивости зависимой переменной примерно одинаковы. У березы преобладает вклад диаметра ствола по отношению к возрасту дерева и происхождению (опосредованному бинарной переменной), возможно потому, что данные о деревьях в условиях степной зоны получены

Таблица 2. Характеристика моделей (1)

| Зависимая переменная | a       | $b_1(\ln A)$ | $b_2(\ln D)$ | $b_3(\ln A) \times (\ln D)$ | $b_4(X)$ | adjR <sup>2</sup> | SE   |
|----------------------|---------|--------------|--------------|-----------------------------|----------|-------------------|------|
| Сосна обыкновенная   |         |              |              |                             |          |                   |      |
| ln (ТК)              | −2.1158 | −0.1238      | 0.6658       | 0.0522                      | −0.2828  | 0.848             | 0.30 |
| ln (ОТК)             | 2.4899  | −0.1238      | −0.3342      | 0.0522                      | −0.2828  | 0.312             | 0.30 |
| Береза повислая      |         |              |              |                             |          |                   |      |
| ln (ТК)              | −2.7326 | −0.3505      | 1.4231       | —                           | −0.1474  | 0.815             | 0.24 |
| ln (ОТК)             | 1.6388  | −0.2908      | 0.4245       | —                           | −0.1563  | 0.298             | 0.24 |
| Лиственница          |         |              |              |                             |          |                   |      |
| ln (ТК)              | −4.5850 | 0.4721       | 1.5041       | −0.1471                     | 0.3990   | 0.847             | 0.26 |
| ln (ОТК)             | −0.3536 | 0.5499       | 0.6893       | −0.1861                     | 0.3921   | 0.377             | 0.23 |
| Пихта и ель          |         |              |              |                             |          |                   |      |
| ln (ТК)              | −2.8079 | —            | 0.7699       | —                           | −0.2604  | 0.815             | 0.19 |
| ln (ОТК)             | 1.7973  | —            | −0.2301      | —                           | −0.2605  | 0.449             | 0.19 |

Примечание. adjR<sup>2</sup>— коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE — стандартная ошибка уравнения.

**Таблица 3.** Вклады (%) независимых переменных моделей (1) в объяснение изменчивости зависимых переменных

| Зависимая переменная | Независимые переменные |                |                     |
|----------------------|------------------------|----------------|---------------------|
|                      | Возраст дерева         | Диаметр ствола | Бинарная переменная |
| Сосна обыкновенная   |                        |                |                     |
| ТК                   | 15.7                   | 45.3           | 39.0                |
| ОТК                  | 19.5                   | 31.5           | 49.0                |
| Береза повислая      |                        |                |                     |
| ТК                   | 8.7                    | 80.5           | 10.8                |
| ОТК                  | 20.0                   | 55.2           | 24.8                |
| Лиственница          |                        |                |                     |
| ТК                   | 24.4                   | 44.8           | 30.8                |
| ОТК                  | 34.2                   | 30.7           | 35.1                |
| Пихта и ель          |                        |                |                     |
| ТК                   | —                      | 73.6           | 26.4                |
| ОТК                  | —                      | 45.9           | 54.1                |

путем сплошной рубки спелого порослевого древостоя. При объяснении изменчивости ТК у пихты и ели преобладает диаметр ствола (74% против 26%), а при объяснении изменчивости ОТК — наоборот (46% против 54%).

Регрессионные модели (1), представленные в табл. 2, могут быть использованы при перечетах деревьев по ступеням толщины в древостоях известного возраста с целью раздельной таксации древесины и коры. В общем случае, когда возраст древостоя неизвестен или учет его влияния на толщину коры у сосны, березы и лиственницы по какой-то причине неактуален, для практического использования и межвидовых сопоставлений могут быть востребованы зависимости ТК и ОТК только от диаметра ствола. Для построения подобных зависимостей нами рассчитаны вспомогательные уравнения:

— для сосны:

$$\ln A = 2.6032 + 0.5372 \ln D - 0.3218 X; \quad (2)$$

$$\text{adj}R^2 = 0.449; SE = 0.50;$$

— для березы:

$$\ln A = 3.2483 + 0.2182 \lg D + 0.1732 X; \quad (3)$$

$$\text{adj}R^2 = 0.406; SE = 0.14;$$

— для лиственницы:

$$\ln A = 1.6989 + 0.7758 \lg D + 0.8940 X; \quad (4)$$

$$\text{adj}R^2 = 0.517; SE = 0.50.$$

Все регрессионные коэффициенты моделей (2)–(4) значимы на уровне вероятности  $p < 0.9999$ . Модели (2)–(4), с одной стороны, и модель (1), с другой — представляют систему связанных (рекурсивных) уравнений, основным достоинством

которой является внутренняя согласованность оценок (Waggen, 1971). В названной системе зависимая переменная уравнений (2)–(4) выступает в качестве одной из независимых переменных в (1) (Маленко, 1975). Путем табулирования моделей (2)–(4) по значениям бинарной переменной и задаваемым ступеням толщины в диапазоне фактических значений диаметров ствола (см. табл. 1) получены расчетные значения возраста. На втором этапе табулируются модели (1) по значениям бинарной переменной, задаваемым значениям диаметра и расчетным значениям возраста. Результаты сведены в табл. 4.

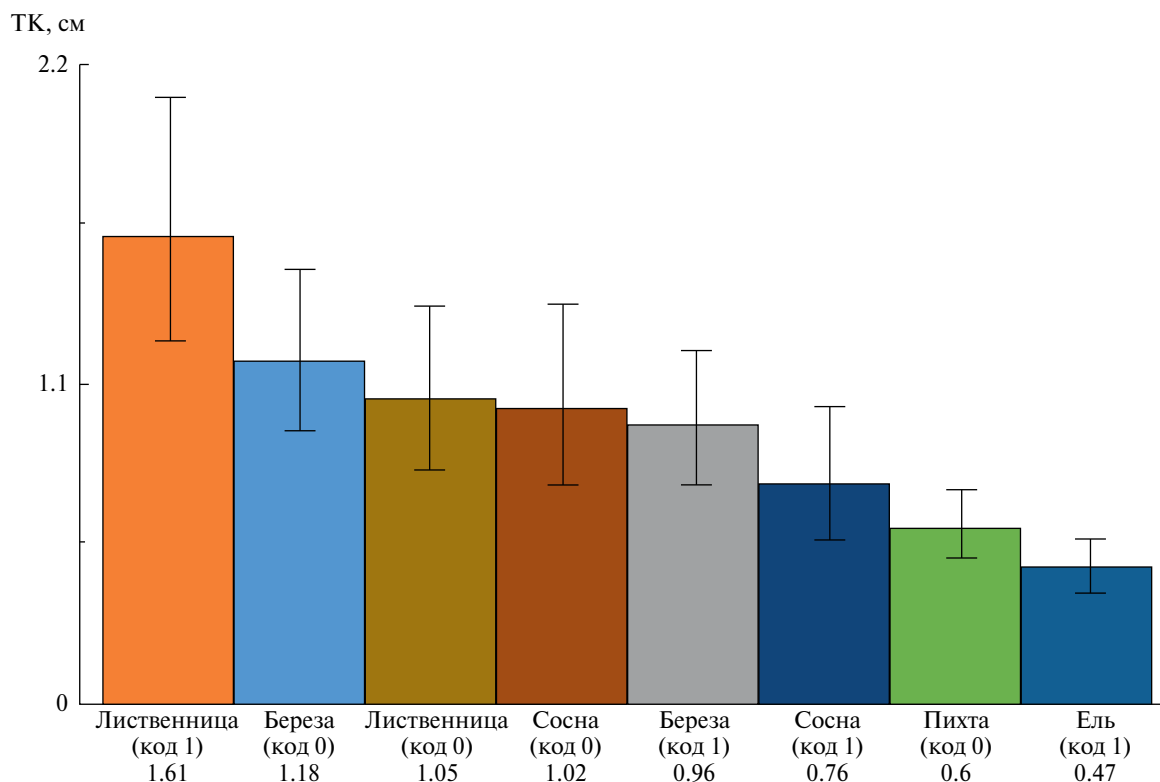
По данным табл. 4 рассчитаны различия толщины коры по сравниваемым вариантам в процентном выражении, и они оказались во всех случаях одинаковы как для ТК, так и для ОТК. Оказалось, что ТК и ОТК сосны в зоне сухих степей выше, чем в таежной зоне, на 33%. Это согласуется с известными ранее опубликованными результатами. Сосна обыкновенная, произрастающая в островных борах Тургайского прогиба в зоне сухих степей, представляет интразональное явление. “Нынешние оренбургские степи, — пишет Ф.Т. Кеппен (1885), — в глубокой древности изобиловали хорошими лесами, истребленными в последствии времени полудикими азиатскими народами, кочевавшими здесь до начала 18-го столетия” (с. 109). Здесь в плейстоцене в процессе длительного приспособления к исключительно жестким условиям произрастания сформировался особый подвид — сосна кулундинская (*Pinus sylvestris* L. ssp. *kulundensis* Sukacz.). К этому подвиду Л.Ф. Правдин (1964) относит все климатические экотипы сосны обыкновенной, расположенные южнее 52° с.ш. от восточных склонов Южного Урала до южного Забайкалья и Монголии. Было обнаружено наличие более толстой коры у этого подвида в сравнении с сосной обыкновенной в таежной зоне, что объясняли влиянием жестких климатических условий, и особенно лесных пожаров, наносивших большой урон сосновым лесам на юге их ареала (Кеппен, 1885; Правдин, 1964; Грибанов и др., 1970).

Согласно табл. 4, толщина коры березы в сухих степных условиях больше, чем в условиях южной тайги, на 23%. Наличие более толстой коры у березы в сухих условиях Казахского мелкосопочника (53°00' с.ш.) по сравнению с березой, произрастающей в южной тайге Урала (55°30' с.ш.), возможно, определяется различиями регионов по преобладающим формам коры (Погиба, Казанцева, 2014). В частности, преобладание гладкокорых форм на Урале (Махнев, 1965) и грубокорых форм в казахстанских степях (Данченко, 1982) можно объяснить влиянием засушливого климата и, как следствие, лесных пожаров в степных условиях.

Согласно табл. 4, толщина коры лиственницы в лесотундре больше, чем в условиях сухой степи, на 63%. К западу от Урала лиственница Сукачева имеет регрессирующий “продырявленный” ареал

**Таблица 4.** Зависимость толщины коры (ТК) и относительной толщины коры (ОТК) от диаметра ствола на высоте груди в коре (*D*) согласно моделям (1)–(4). Кодирование бинарных переменных здесь и далее соответствует показанному в табл. 1

| <i>D</i> , см | <i>A</i> , лет                              |       | Сосна обыкновенная                      |        |                               |        |
|---------------|---------------------------------------------|-------|-----------------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
|               |                                             |       | Сухая степь (код 0)                     |        | Средняя и южная тайга (код 1) |        |
|               | код 0                                       | код 1 | ТК, см                                  | ОТК, % | ТК, см                        | ОТК, % |
| 2             | 20                                          | 14    | 0.15                                    | 7.37   | 0.11                          | 5.71   |
| 4             | 28                                          | 21    | 0.26                                    | 6.39   | 0.20                          | 4.89   |
| 8             | 41                                          | 30    | 0.45                                    | 5.69   | 0.34                          | 4.31   |
| 12            | 51                                          | 37    | 0.65                                    | 5.38   | 0.49                          | 4.05   |
| 16            | 60                                          | 43    | 0.83                                    | 5.20   | 0.62                          | 3.89   |
| 20            | 68                                          | 49    | 1.02                                    | 5.08   | 0.76                          | 3.79   |
| 24            | 74                                          | 54    | 1.20                                    | 5.00   | 0.89                          | 3.72   |
| 28            | 81                                          | 59    | 1.38                                    | 4.94   | 1.02                          | 3.66   |
| 32            | 87                                          | 63    | 1.56                                    | 4.89   | 1.16                          | 3.62   |
| <i>D</i> , см | <i>A</i> , лет                              |       | Береза повислая                         |        |                               |        |
|               |                                             |       | Сухая степь (код 0)                     |        | Южная тайга (код 1)           |        |
|               | код 0                                       | код 1 | ТК                                      | ОТК    | ТК                            | ОТК    |
| 6             | 38                                          | 45    | 0.23                                    | 3.82   | 0.19                          | 3.11   |
| 8             | 41                                          | 48    | 0.34                                    | 4.24   | 0.28                          | 3.45   |
| 12            | 44                                          | 53    | 0.59                                    | 4.91   | 0.48                          | 3.99   |
| 16            | 47                                          | 56    | 0.87                                    | 5.45   | 0.71                          | 4.43   |
| 20            | 49                                          | 59    | 1.18                                    | 5.90   | 0.96                          | 4.80   |
| 24            | 52                                          | 61    | 1.50                                    | 6.31   | 1.22                          | 5.13   |
| 28            | 53                                          | 63    | 1.85                                    | 6.67   | 1.50                          | 5.42   |
| 32            | 55                                          | 65    | 2.22                                    | 7.00   | 1.80                          | 5.69   |
| <i>D</i> , см | <i>A</i> , лет                              |       | Лиственница Сукачева                    |        | Лиственница сибирская         |        |
|               |                                             |       | Сухая степь (код 0)                     |        | Лесотундра (код 1)            |        |
|               | код 0                                       | код 1 | ТК                                      | ОТК    | ТК                            | ОТК    |
| 6             | 22                                          | 54    | 0.29                                    | 4.71   | 0.52                          | 8.46   |
| 8             | 27                                          | 67    | 0.40                                    | 5.05   | 0.70                          | 8.65   |
| 12            | 38                                          | 92    | 0.63                                    | 5.35   | 1.03                          | 8.56   |
| 16            | 47                                          | 115   | 0.85                                    | 5.41   | 1.34                          | 8.25   |
| 20            | 56                                          | 137   | 1.05                                    | 5.37   | 1.61                          | 7.89   |
| 24            | 64                                          | 157   | 1.24                                    | 5.28   | 1.85                          | 7.53   |
| 28            | 73                                          | 177   | 1.42                                    | 5.17   | 2.08                          | 7.18   |
| 32            | 80                                          | 197   | 1.59                                    | 5.04   | 2.29                          | 6.86   |
| <i>D</i> , см | Пихта сибирская, сред-<br>няя тайга (код 0) |       | Ель сибирская,<br>средняя тайга (код 1) |        |                               |        |
|               | ТК                                          | ОТК   | ТК                                      | ОТК    |                               |        |
|               |                                             |       |                                         |        |                               |        |
| 6             | 0.24                                        | 3.99  | 0.18                                    | 3.08   |                               |        |
| 8             | 0.30                                        | 3.74  | 0.23                                    | 2.88   |                               |        |
| 12            | 0.41                                        | 3.41  | 0.32                                    | 2.62   |                               |        |
| 16            | 0.51                                        | 3.19  | 0.39                                    | 2.46   |                               |        |
| 20            | 0.61                                        | 3.03  | 0.47                                    | 2.33   |                               |        |
| 24            | 0.70                                        | 2.90  | 0.54                                    | 2.24   |                               |        |
| 28            | 0.78                                        | 2.80  | 0.60                                    | 2.16   |                               |        |
| 32            | 0.87                                        | 2.72  | 0.67                                    | 2.09   |                               |        |
| 36            | 0.95                                        | 2.65  | 0.73                                    | 2.04   |                               |        |



**Рис.** Ранжирование видов по толщине коры в убывающей последовательности при среднем диаметре на высоте груди 20 см. Показаны средние значения и их стандартные отклонения. Цифры вдоль оси абсцисс обозначают толщину коры, см.

(Ильинский, 1937) и часто приурочена к песчаным эоловым наносам (Бутаков, 1986). Она распространяется далеко в южном направлении и в смеси с сосной и березой растет в естественном состоянии в условиях сохранившейся “плейстоценовой лесостепи” (Крашенинников, 1937) как в естественном состоянии (Пугачев, 1973), так и в культурах (Верзун, 1986), достигая 52°32' с.ш. в сухой степи Тургайского прогиба. Именно в этих условиях в 40-летних культурах были взяты наши модельные деревья. Вторым объектом была лиственница сибирская, произрастающая в естественном состоянии в лесотундре низовий р. Пур на многолетней мерзлоте (66°30' с.ш.). Формирование лиственницы сибирской в условиях физиологической сухости на мерзлотных грунтах и экстремально низких температур (Тюлина, 1929; Софронов, Волокитина, 1998) и формирование лиственницы Сукачева в менее жестких условиях произрастания на песчаных эоловых наносах и южных черноземах (Пугачев, 1973; Бутаков, 1986), по-видимому, обусловили наличие более толстой коры у лиственницы сибирской. Наличие более толстой коры у лиственницы в лесотундре объясняется и большим возрастом: если в степи возраст ее не превышает 42 лет, то в лесотундре лиственница представлена большим количеством перестойных деревьев (вплоть до 380 лет), обладающих толстой коркой.

Согласно табл. 4, толщина коры у пихты больше, чем у ели, на 30%. Это различие статистически значимо на уровне  $p < 0.05$  ( $t_{\text{факт}} = 2.6 > t_{0.05} = 1.96$ ), и его нельзя отнести к влиянию возраста, поскольку возрастной диапазон елей и пихт примерно одинаков (табл. 1). Полученное различие елей и пихт на Урале противоречит данным (статистически не подтвержденным) сортиментных таблиц еловых и пихтовых древостоев Казахстана (Макаренко, 1987), согласно которым процент коры пихты составляет 9% против 14% у ели. Названное несоответствие объясняется какими-то неучтенными факторами, возможно, различиями “макроскопической морфологии” коры (анатомии ритидома, например, соотношения в нем первичной коры и вторичной флоэмы) у ели и пихты в регионах (Dickison, 2000; Williams et al., 2005). Опубликованные данные о толщине коры пихты и ели в условиях Сибири представлены в разных форматах (Вайс, 2010; Шевелев и др., 2017), по которым невозможно судить о наличии или отсутствии различия двух видов по толщине коры. Насколько нам известно, других возможностей сопоставления толщины коры пихты и ели в бореальной зоне литературные источники не предоставляют.

Ранжирование видов по толщине коры выполнено с учетом ее различий по сравниваемым вариантам при диаметре ствола, среднем для всех видов и равном 20 см (рис.). Поскольку различие видов

по сравниваемым вариантам в процентном выражении было одинаковым для ТК и ОТК, на рисунке представлена последовательность только для ТК, так как для ОТК она в точности повторяется.

Согласно приведенному рисунку, последовательность ранжирования начинается с лиственницы сибирской и заканчивается елью сибирской, соответственно при более чем трехкратном различии толщины коры у двух видов. В целом последовательность видов в порядке снижения толщины коры следующая: лиственница сибирская лесотундры, береза степной зоны, лиственница степной зоны, сосна степной зоны, береза южной тайги, сосна таежной зоны, пихта и ель таежной зоны. Ранжирование видов, предложенное выше А.С. Васильевым (2012), отличается от нашего результата. Оно было выполнено А.С. Васильевым в отношении сортиментов, заготовленных из разных частей стволов соответственно с разной долей коры, тогда как наше ранжирование видов выполнено по толщине коры на фиксированной высоте ствола (1.3 м от его основания). Поскольку с возрастом диаметр на высоте груди смещается вверх по стволу, приведенное на рисунке ранжирование видов применимо лишь к средним значениям возраста и диаметра ствола на высоте груди, которыми характеризуются наши исходные данные (см. табл. 1).

## ВЫВОДЫ

1. На примере пяти лесообразующих видов построены регрессионные модели толщины коры, включающие в качестве независимых переменных возраст и диаметр ствола, а также бинарную переменную, кодирующую принадлежность исходных данных к тому или иному региону (или виду). Модели для относительной толщины коры (процентного отношения толщины коры к диаметру ствола в коре) по сравнению с моделями для собственно толщины коры характеризуются коэффициентами детерминации, существенно более низкими. Тем не менее, регрессионные коэффициенты моделей для тех и других значимы на уровнях вероятности в диапазоне от  $p < 0.98$  до  $p < 0.999$ .

2. Вклады возраста, диаметра ствола и бинарной переменной в объяснение изменчивости зависимой переменной у сосны и лиственницы примерно одинаковы. У березы вклад диаметра ствола в объяснение изменчивости толщины коры превалирует над вкладом возраста дерева и происхождения древостоя. При объяснении изменчивости толщины коры у пихты и ели преобладает диаметр ствола, а при объяснении изменчивости относительной толщины коры названных видов, напротив, доминирует происхождение древостоя.

3. На статистически значимом уровне установлено, что толщина коры у сосны обыкновенной и березы повислой в зоне степи существенно больше по

сравнению с тайгой, а толщина коры лиственницы сибирской в лесотундре значительно больше по сравнению с лиственницей Сукачева в зоне степи. При совместном произрастании в спелых древостоях таежной зоны Урала толщина коры у ели сибирской существенно меньше (на уровне  $p < 0.05$ ), чем у пихты сибирской. Противоположное соотношение толщин коры, а именно наличие меньшей толщины коры у пихты по сравнению с елью в условиях Казахстана, пока не подлежит объяснению.

4. Последовательность видов по толщине коры в порядке ее снижения при среднем значении диаметра ствола 20 см начинается с лиственницы сибирской и заканчивается елью сибирской, соответственно при более чем трехкратном различии толщины коры названных видов.

\*\*\*

Авторы выражают благодарность И.Е. Бергману за активное участие в получении первичного материала на пробных площадях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бубырь Д.С., Клячкин В.Н., Карпунина И.Н. Использование бинарных переменных при регрессионном моделировании состояния технического объекта // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 6 (2). С. 371–373.
- Бутаков Г.П. Плейстоценовый перигляциал на востоке Русской равнины. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1986. 144 с.
- Вайс А.А. Толщина коры нижней части деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Средней Сибири // Вестник КрасГАУ. 2009. № 7. С. 44–47.
- Вайс А.А. Толщина коры нижней части деревьев ели сибирской (*Picea sibirica*) в условиях Средней Сибири // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия Естественные и технические науки. 2010. № 8 (113). С. 60–63.  
<https://elibrary.karelia.ru/book.shtml?id=23121#t20c>
- Васильев А.С. Круглые лесоматериалы как предмет труда при групповой окорке [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. Вып. 4. Ростов-на-Дону, 2012. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1398> (дата обращения: 10.04.2023).
- Верзунов А.И. Влияние почвенно-грунтовых условий на формирование корневых систем сосны и лиственницы в степных борах Казахстана // Экология. 1986. № 5. С. 69–71.
- Воропанов П.В. Определение объема ствола без коры у растущего дерева // Известия вузов. Лесной журнал. 1982. № 5. С. 20–23.
- Грибанов Л.Н., Лагов И.А., Чабан П.С. Леса Казахстана // Леса СССР. Т. 5. М.: Наука, 1970. С. 5–77.
- Грязькин А.В., Беляева Н.В., Данилов Д.А., Ванджурак Г.В., Хунг Ву Ван. Изменчивость толщины и массы коры березы по длине ствола // Известия вузов. Лесной журнал. 2019. № 2. С. 32–39.



- Гусев И.И. Толщина и объем коры древесных стволов ели // Лесная таксация и лесоустройство. Красноярск, 1981. С. 24–30.
- Данченко А.М. Береза. Алма-Ата: Кайнар, 1982. 72 с.
- Дитрих В.И. Линейные и объемные показатели коры лиственницы сибирской // Труды ЛТА. 1970. С. 95–101.
- Домрачева З.Н., Кириллова К.В., Денисов С.А. Роль коры сосны обыкновенной в защите от низовых пожаров // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. № 55. С. 90–93.
- Дыренков С.А. Толщина коры и ее доля в объеме стволовой части деревьев разновозрастных ельников Пермской области // Растительные ресурсы. 1973. Т. 9. Вып. 1. С. 107–112.
- Евстафьев В.Н. Закономерности формирования коры лиственницы сибирской в условиях Приангарского района: автореф. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Красноярск: СибГТУ, 2007. 23 с.
- Ефремова М.Н., Шевелев С.Л. Особенности формирования коры у стволов березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в лесостепной зоне Средней Сибири // Лесохозяйственная информация. 2017. № 2. С. 26–35.
- Захаров В.К. Таблицы объема и сбег маломерных стволов сосны и методика их составления // Сборник научных трудов / Белорусский лесотехнический институт имени С.М. Кирова. Вып. VIII. Минск: Изд-во БГУ, 1956. С. 40–55.
- Ильинский А.П. Растительность земного шара. М.–Л.: АН СССР, 1937. 458 с.
- Кеппен Ф.Т. Географическое распространение хвойных деревьев в Европейской России и на Кавказе // Записки Императорской Академии наук. Т. 50. № 4 (приложение). СПб, 1885. 634 с.
- Крашенинников И.М. Анализ реликтовой флоры Южного Урала в связи с историей растительности и палеогеографией плейстоцена // Советская ботаника. 1937. № 4. С. 16–45.
- Леонтьев Н.Л. Техника статистических вычислений. М.: Лесная промышленность, 1966. 250 с.
- Макаренко А.А. Сортиментные и товарные таблицы для лесов Казахстана. Часть 2. Алма-Ата: Кайнар, 1987. 227 с.
- Маленко Э. Статистические методы эконометрии. Вып. 1. М.: Статистика, 1975. 422 с. (пер. с франц.).
- Махнев А.К. Формы березы в лесах Припышминского Зауралья и их таксационно-морфологическая характеристика // Труды Института биологии. Уральский филиал АН СССР. 1965. Вып. 47. С. 55–61.
- Нахабцев И.А. Таксация древесной коры. Л.: ЛЛТА, 1990. 36 с.
- Перелыгин А.М., Уголев Б.Н. Древесиноведение. М.: Лесная промышленность, 1971. 318 с.
- Погиба С.П., Казанцева Е.В. Гибридологический анализ сибов березы повислой по коре // Лесной вестник. 2014. № 4. С. 6–12.
- Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. М.: Наука, 1964. 192 с.
- Пугачев П.Г. Некоторые эколого-морфологические особенности лиственницы Сукачева в степном Зауралье // Экология. 1973. № 3. С. 31–35.
- Пчелинцев В.И. Таксация коры лиственницы // Лиственница: проблемы комплексной переработки. Красноярск: СибТИ, 1987. С. 9–14.
- Рой Ю.Ф., Левковская М.В. Типы трещиноватости и защитные свойства корки сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях юго-запада Беларуси // Веснік Мазырскага ДПУ імя Шамякіна. 2011. № 3. С. 55–60.
- Софронов М.А., Волокитина А.В. Об экологических особенностях зоны северных редколесий в Средней Сибири // Сибирский экологический журн. 1998. № 3–4. С. 245–250.
- Тюлина Л.Н. К эволюции растительного покрова предгорий Южного Урала // Записки Златоустовского общества краеведения. 1929. Вып. 1. 18 с.
- 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>).
- Фуряев В.В., Фуряев Е.А. Пирозкологические свойства сосны обыкновенной в Средней Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2008. Т. XXV. № 1–2. С. 103–108.
- Шевелев С.Л. Таксация леса. Таксация коры лесообразующих пород Сибири. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023. 44 с.
- Шевелев С.Л. Формирование коры у деревьев лиственницы сибирской // Сибирский лесной журнал. 2016. № 4. С. 134–138.
- Шевелев С.Л., Кучеренко А.Н. Некоторые закономерные связи размерных характеристик коры лиственницы сибирской в Хакасии // Лиственница: проблемы комплексной переработки. Красноярск: СибТИ, 1989. С. 12–17.
- Шевелев С.Л., Смольянов А.С., Красиков И.И., Батвенкина Т.В. Закономерности формирования коры у стволов сосны кедровой сибирской // Хвойные бореальной зоны. 2015. Т. XXXIII. № 3–4. С. 135–138.
- Шевелев С.Л., Смольянов А.С., Красиков И.И., Братилов Н.П. Формирование коры у стволов пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) в центральной части Средней Сибири // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (149). С. 72–78.
- Baskerville G.L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. V. 2 (1). P. 49–53.
- Bonyad A.E., Sima A., Bakhshandeh A., Dadras H. Evaluation of non-destructive Meyer method for determination of bark volume of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in different geographical aspects // Caspian Journal of Environmental Sciences. 2012. V. 10. № 1. P. 67–73.
- Catry F.X., Moreira F., Pausas J.G., Fernandes P.M., Rego F., Cardillo E., Curt T. Cork oak vulnerability to fire: The role of bark harvesting, tree characteristics and abiotic factors // PLoS ONE. 2012. V. 7 (6). Article ID: e39810.
- Chauhan S.K., Gupta N., Yadav R.S., Chauhan R. Biomass and carbon allocation in different parts of agroforestry tree species // Indian Forester. 2009. V. 135. P. 981–993.
- Dreška A., Līpiņš L., Sarmulis Z. Priedes un egleš stumbrmizas biezums (The bark thickness of pine and spruce stems) // Mežzinātne. 2003. V. 45. P. 131–137 (in Latvian with English resume).
- Dickison W.C. Integrative Plant Anatomy. San Diego: Academic Press, 2000. 533 p.

- Evert R.F., Eichhorn S.E. Esau's plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2006. 601p.
- Freese F. Linear regression methods for forest research. USDA Forest Service. Res. Paper FPL 17. Madison, 1964. 136 p.
- Gholz H.L. Structure and productivity of *Juniperus occidentalis* in Central Oregon // American Midland Naturalist. 1980. V. 103 (2). P. 251–261.
- Harmon M.E. Survival of trees after low-intensity surface fires in Great Smoky Mountains National Park // Ecology. 1984. V. 65. P. 796–802.
- Karizumi N. The mechanism and function of tree root in the process of forest production. (I). Methods of investigation and estimation of the root biomass // Bulletin of the Government Forest Experiment Station. 1974. V. 259. P. 1–99.
- Kunze M.F. Untersuchungen über die Genauigkeit der Inhaltsberechnung der Stämme aus Mittenstärke und Länge. Berlin: Verlagsbuchhandlung Paul Parey, 1912. 54 p.
- Kurt Y., Calikoglu M., Isik K. Relationships between bark thickness, tree age and tree diameter in *Pinus brutia* Ten. plantations // Fresenius Environmental Bulletin. 2021. V. 30. № 4. P. 3122–3129.
- Laasasenaho J., Melkas T., Alden S. Modelling bark thickness of *Picea Abies* with taper curves // Forest Ecology and Management. 2005. V. 206. P. 35–47.
- Lawes M.J., Midgley J.J., Clarke P.J. Costs and benefits of relative bark thickness in relation to fire damage: A savanna/forest contrast // Journal of Ecology. 2013. V. 101. P. 517–524.
- Liepiņš J., Liepiņš K. Evaluation of bark volume of four tree species in Latvia // Research for Rural Development. 2015. V. 2. P. 22–28.
- Marshall H.D., Murphy G.E., Lachenbruch B. Effects of bark thickness estimates on optimal log merchandising // Forest Products Journal. 2006. V. 56. P. 87–92.
- Mascaro J., Litton C.M., Hughes R.F., Uowolo A., Schnitzer S.A. Is logarithmic transformation necessary in allometry? Ten, one-hundred, one-thousand-times yes // Biological Journal of the Linnean Society. 2014. V. 111. P. 230–233.
- Mirabdollahi S.M., Bonyad A.E., Torkaman J., Bakhshandeh N.B. Modeling of effective variables on bark thickness of *Fagus orientalis* Lipsky in the Asalem forest area // Journal of Wood & Forest Science and Technology. 2011. V. 18 (3). P. 79–90 (in Persian with English resume).
- Murphy G., Cown D. Within-tree, between-tree, and geo-spatial variation in estimated *Pinus radiata* bark volume and weight in New Zealand // New Zealand Journal of Forestry Science. 2015. V. 45. Article ID: 18.
- Pausas J.G. Bark thickness and fire regime // Functional Ecology. 2015. V. 29. P. 315–327.
- Philip M.S. Measuring trees and forest. CAB International, Walling Ford, UK, 1994. 310 p.
- Richardson S.J., Laughlin D.C., Lawes M.J., Holdaway R.J., Wilmschurst J.M., Wright M., Curran T.J., Bellingham P.J., McGlone M.S. Functional and environmental determinants of bark thickness in fire-free temperate rain forest communities // American Journal of Botany. 2015. V. 102. № 10. P. 1590–1598.
- Rosell J.A. Bark thickness across the angiosperms: More than just fire // New Phytologist. 2016. V. 211. P. 90–102.
- Sonmez T., Keles S., Tilki F. Effect of aspect, tree age and tree diameter on bark thickness of *Picea orientalis* // Scandinavian Journal of Forest Research. 2007. V. 22. P. 193–197.
- Stängle S.M., Sauter U.H., Dormann C.F. Comparison of models for estimating bark thickness of *Picea abies* in South-west Germany: The role of tree, stand, and environmental factors // Annals of Forest Science. 2017. V. 74. Article 16.
- Usoltsev V.A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia: monograph. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. (CD-ROM). (<https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649>).
- Valipour A., Namiranian M., Etemad V., Ghazanfari H. Relationships between diameter, height and geographical aspects with bark thickness of Lebanon oak tree (*Quercus libani* Olive.) in Armardeh, Baneh (Northern Zagros of Iran) // Research Journal of Forestry. 2009. V. 3 (1). P. 1–7.
- Vines R.G. Heat transfer through bark and the resistance of trees to fire // Australian Journal of Botany. 1968. V. 16. P. 499–514.
- Warren W.G. Record of preplanned and spontaneous discussions concerning the paper by Furnival G.M. and Wilson R.W. "Systems of equations for predicting forest growth and yield" // Statistical Ecology. 1971. V. 3. P. 56–57.
- Williams V.L., Witkowski E.T.F., Balkwill K. Height, branch-free bole length and bark thickness for six tree species used medicinally in South Africa // Koedoe. 2005. V. 48. P. 57–65.
- Williams V.L., Witkowski E.T.F., Balkwill K. Relationship between bark thickness and diameter at breast height for six tree species used medicinally in South Africa // South African Journal of Botany. 2007. V. 73. P. 449–465.
- Yilmaz E., Ozdemir E., Makineci E. Bark thickness models for oak forests being converted from coppice to high forests in Northwestern Turkey // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. V. 193. Article 728.
- Zeng W.S. Developing tree biomass models for eight major tree species in China // Biomass volume estimation and valorization for energy. Chapter 1. Intech Publ., 2017. P. 3–21.

# Bark Thickness of Forest-forming Species: Modeling and Comparative Analysis\*

V.A. Usoltsev<sup>a, b, \*</sup>, I.S. Tsepordey<sup>a</sup>, A.F. Urazova<sup>b</sup>, A.V. Bornikov<sup>c</sup>, N.I. Plyukha<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Botanical Garden, Ural Branch of RAS, 8 Marta Str., 202a, Yekaterinburg, 620144 Russia

<sup>b</sup> Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100 Russia

<sup>c</sup> Orenburg State Agrarian University, Chelyuskintsev str., 18, Orenburg, 460024 Russia

\*E-mail: Usoltsev50@mail.ru

The need to assess the carbon-depositing capacity of a stand, an individual tree and its components is constantly emphasized in the world literature, since mitigation of the effects of climate change has become the highest priority. Since the carbon concentration differs in different tree species and in different components of the tree, including in the stem wood and bark, it is necessary to develop species-specific mathematical models for estimating the proportion of bark in trunks to improve the accuracy of knowledge about the carbon balance of forests. The relationship of bark thickness with both age and diameter of the tree trunk is known, but with respect to its regional variability, the data are contradictory. According to the actual data from 1100 model trees of five forest-forming species, allometric models of a mixed type have been developed. They include as independent variables the age and diameter of the trunk, as well as a binary variable characterising the influence of the growing area itself on the bark thickness of Scots pine, silver birch and Siberian larch, as well as the difference in the thickness of the bark between Siberian spruce and Siberian fir in case of joint growth in mature stands of the taiga zone. At a statistically significant level, it was found that the bark thickness of Scots pine and silver birch trees in the steppe zone is significantly greater compared to the taiga zone, and the bark thickness of Siberian larch trees in the forest-tundra is significantly greater compared to the steppe zone. The bark thickness of Siberian spruce trees is significantly less than that of Siberian fir trees. The ranking of species by bark thickness is included in the paper.

**Key words:** Scots pine, silver birch, Siberian larch, Siberian fir, Siberian spruce, bark thickness, allometric models, regional differences, species ranking.

**Acknowledgements:** The work was carried out according to the state task of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The authors express their gratitude to I.E. Bergman for his active participation in obtaining primary material on sample plots.

## REFERENCES

- Baskerville G.L., Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass, *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, Vol. 2, No. 1, pp. 49–53.
- Bonyad A.E., Sima A., Bakhshandeh A., Dadras H., Evaluation of non-destructive Meyer method for determination of bark volume of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in different geographical aspects, *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 2012, Vol. 10, No.1, pp. 67–73.
- Bubyr' D.S., Klyachkin V.N., Karpunina I.N., Ispol'zovanie binarnykh peremennykh pri regressionnom modelirovanii sostoyaniya tekhnicheskogo ob'ekta (Use of binary variables in regression modeling of the state of a technical object), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, Vol. 16, No. 6 (2), pp. 371–373.
- Butakov G.P., *Pleistotsenovyy periglyatsial na vostoke Russkoi ravniny* (Pleistocene periglacial in the east of the Russian Plain), Kazan: Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta, 1986, 144 p.
- Catry F.X., Moreira F., Pausas J.G., Fernandes P.M., Rego F., Cardillo E., Curt T., Cork oak vulnerability to fire: The role of bark harvesting, tree characteristics and abiotic factors, *PLoS ONE*, 2012, Vol. 7, No 6, Article ID: e39810.
- Chauhan S.K., Gupta N., Yadav R.S., Chauhan R., Biomass and carbon allocation in different parts of agroforestry tree species, *Indian Forester*, 2009, Vol. 135, pp. 981–993.
- Danchenko A.M., *Bereza* (Birch), Alma-Ata: Kainar, 1982, 72 p.
- Dickison W.C., *Integrative Plant Anatomy*, San Diego: Academic Press, 2000, 533 p.
- Ditrikh V.I., Lineinye i ob'emnye pokazateli kory listvennitsy sibirskoi (Linear and volumetric indicators of Siberian larch bark), In: *Trudy LTA* (Scientific works of the Leningrad Forestry Academy), 1970, pp. 95–101.
- Domracheva Z.N., Kirillova K.V., Denisov S.A., Rol' kory sosny obyknovЕННОй v zashchite ot nizovykh pozharov (The role of the bark of the Scots pine in protection from grass-roots fires), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2019, No. 55, pp. 90–93.
- Drēška A., Lipiņš L., Sarmulis Z., Priedes un egles stumbru mizas biezums (The bark thickness of pine and spruce stems), *Mežzinātne*, 2003, Vol. 45, pp. 131–137 (in Latvian with English resume).
- Dyrenkov S.A., Tolshchina kory i ee dolya v ob'eme stvolovoi chasti derev'ev raznovozrastnykh el'nikov Permskoi oblasti (Bark thickness and its share in the volume of the stem part of trees in spruce forests of different ages of the Perm region), *Rastitel'nye resursy*, 1973, Vol. 9, No. 1, pp. 107–112.
- Efremova M.N., Shevelev S.L., Osobennosti formirovaniya kory u stvolov berezy povisloi (*Betula pendula* Roth.) v lesostepnoi zone Srednei Sibiri (Features of bark formation

- in the trunks of the silver birch (*Betula pendula* Roth.) in the forest-steppe zone of Central Siberia), *Lesokhozyaistvennaya informatsiya*, 2017, No. 2, pp. 26–35.
- Evert R.F., Eichhorn S.E., *Esau's plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development*, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2006, 601 p.
- Evstaf'ev V.N., Zakonomernosti formirovaniya kory listvennitsy sibirskoi v usloviyakh Priangarskogo raiona: avtoref. kand. s.-kh. nauk (Regularities of formation of Siberian larch bark in the conditions of the Angara region. Extended abstract of agric. sci. thesis), Krasnoyarsk, SibGTU, 2007, 23 p.
- Freese F., *Linear regression methods for forest research*, USDA Forest Service, Research Paper FPL 17, Madison, 1964, 136 p.
- Furyaev V.V., Furyaev E.A., Piroekologicheskie svoystva sosny obyknovnoy v Srednei Sibiri (Pyroecological properties of Scots pine in Central Siberia), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2008, Vol. 25, No. 1–2, pp. 103–108.
- Gholz H.L., Structure and productivity of *Juniperus occidentalis* in Central Oregon, *American Midland Naturalist*, 1980, Vol. 103(2), pp. 251–261.
- 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.
- Gryaz'kin A.V., Belyaeva N.V., Danilov D.A., Vandzhurak G.V., Khung Vu Van, Izmenchivost' tolshchiny i massy kory berezy po dline stvola (Variability of thickness and weight of birch bark along the length of the trunk), *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2019, No. 2, pp. 32–39.
- Gusev I.I., Tolshchina i ob'em kory drevesnykh stvolov eli (Thickness and volume of bark of tree trunks of spruce). In: *Lesnaya taksatsiya i lesoustroistvo*, Krasnoyarsk, 1981, pp. 24–30.
- Harmon M.E., Survival of trees after low-intensity surface fires in Great Smoky Mountains National Park, *Ecology*, 1984, Vol. 65, pp. 796–802.
- Il'inskii A.P., *Rastitel'nost' zemnogo shara* (Vegetation of the Globe), Moscow, Leningrad: AN SSSR, 1937, 458 p.
- Karizumi N., The mechanism and function of tree root in the process of forest production. (I). Methods of investigation and estimation of the root biomass, *Bulletin of the Government Forest Experiment Station*, 1974, Vol. 259, pp. 1–99.
- Keppen F.T., Geograficheskoe rasprostranenie khvoynykh derev'ev v Evropeiskoi Rossii i na Kavkaze (Geographical distribution of coniferous trees in European Russia and the Caucasus). *Zapiski Imperatorskoi Akademii nauk*, Vol. 50, No. 4 (supplement), St.-Petersburg, 1885, 634 p.
- Krashenninnikov I.M., Analiz reliktovoi flory Yuzhnogo Urala v svyazi s istoriei rastitel'nosti i paleogeografiei pleistotsena (Analysis of relict flora of the Southern Urals in relation to the history of vegetation and paleogeography of the Pleistocene), *Sovetskaya botanika*, 1937, No. 4, pp. 16–45.
- Kunze M.F., *Untersuchungen über die Genauigkeit der Inhaltsberechnung der Stämme aus Mittenstärke und Länge*. Berlin: Verlagsbuchhandlung Paul Parey, 1912, 54 p.
- Kurt Y., Calikoglu M., Isik K., Relationships between bark thickness, tree age and tree diameter in *Pinus brutia* Ten. plantations, *Fresenius Environmental Bulletin*, 2021, Vol. 30, No. 4, pp. 3122–3129.
- Laasasenaho J., Melkas T., Alden S., Modelling bark thickness of *Picea Abies* with taper curves, *Forest Ecology and Management*, 2005, Vol. 206, pp. 35–47.
- Lawes M.J., Midgley J.J., Clarke P.J., Costs and benefits of relative bark thickness in relation to fire damage: A savanna/forest contrast, *Journal of Ecology*, 2013, Vol. 101, pp. 517–524.
- Leont'ev N.L., *Tekhnika statisticheskikh vychislenii* (Technique of statistical computation), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1966, 250 p.
- Liepiņš J., Liepiņš K., Evaluation of bark volume of four tree species in Latvia, *Research for Rural Development*, 2015, Vol. 2, pp. 22–28.
- Makarenko A.A., *Sortimentnye i tovarnye tablitsy dlya lesov Kazakhstana* (Wood assortment and commodity tables for forests of Kazakhstan), Alma-Ata: Kainar, 1987, Part 2, 227 p.
- Makhnev A.K., Formy berezy v lesakh Pripyshminskogo Zaural'ya i ikh taksatsionno-morfologicheskaya kharakteristika (Birch forms in the forests of the Pripyshminsky Trans-Urals and their taxation and morphological characteristics), *Trudy Instituta biologii. Ural'skii filial AN SSSR*, 1965, Vol. 47, pp. 55–61.
- Malenkov E., *Statisticheskie metody ekonometrii* (Statistical methods of econometrics), Issue 1, Moscow: Statistics, 1975, 422 p. (translated from French).
- Marshall H.D., Murphy G.E., Lachenbruch B., Effects of bark thickness estimates on optimal log merchandising, *Forest Products Journal*, 2006, Vol. 56, pp. 87–92.
- Mascaro J., Litton C.M., Hughes R.F., Uowolo A., Schnitzer S.A., Is logarithmic transformation necessary in allometry? Ten, one-hundred, one-thousand-times yes, *Biological Journal of the Linnean Society*, 2014, Vol. 111, pp. 230–233.
- Mirabdollahi S.M., Bonyad A.E., Torkaman J., Bakhshandeh N.B., Modeling of effective variables on bark thickness of *Fagus orientalis* Lipsky in the Asalem forest area, *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 2011, Vol. 18, No. 3, pp. 79–90 (in Persian with English resume).
- Murphy G., Cown D., Within-tree, between-tree, and geospatial variation in estimated *Pinus radiata* bark volume and weight in New Zealand, *New Zealand Journal of Forest Science*, 2015, Vol. 45, Article ID: 18.
- Nakhabtsev I.A., *Taksatsiya drevesnoi kory* (Taxation of tree bark), Leningrad: LLTA, 1990, 36 p.
- Pausas J.G., Bark thickness and fire regime, *Functional Ecology*, 2015, Vol. 29, pp. 315–327.
- Pchelintsev V.I., Taksatsiya kory listvennitsy (Taxation of larch bark). In: *Listvennitsa: problemy kompleksnoi pererabotki* (Larch: problems of complex processing), Krasnoyarsk: SibTI, 1987, pp. 9–14.
- Perelygin A.M., Ugolev B.N., *Drevesinovedenie* (Wood science), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1971, 318 p.
- Philip M.S., *Measuring trees and forest*. CAB International, Walling Ford, UK, 1994, 310 p.
- Pogiba S.P., Kazantseva E.V., Gibrilologicheskii analiz sibsov berezy povislnoi po kore (Hybridological analysis of silver birch sibs by bark), *Lesnoi vestnik*, 2014, No. 4, pp. 6–12.
- Pravdin L.F., *Sosna obyknovennaya* (Common pine), Moscow: Nauka, 1964, 192 p.
- Pugachev P.G., Nekotorye ekologo-morfologicheskie osobennosti listvennitsy Sukacheva v stepnom Zaural'e (Some ecological and morphological features of Sukachev larch in the Trans-Ural steppe), *Ekologiya*, 1973, No. 3, pp. 31–35.
- Richardson S.J., Laughlin D.C., Lawes M.J., Holdaway R.J., Wilmschurst J.M., Wright M., Curran T.J., Bellingham P.J., McGlone M.S., Functional and environmental determinants

- of bark thickness in fire-free temperate rain forest communities, *American Journal of Botany*, 2015, Vol. 102, pp. 1590–1598.
- Roi Yu.F., Levkovskaya M.V., Tipy treshchinovatosti i zashchitnye svoystva korki sosny obyknovЕННОй (*Pinus sylvestris* L.) v usloviyakh yugo-zapada Belarusi (Types of fracturing and protective properties of the bark of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the conditions of the south-west of Belarus), *Vesnik Mazyrskaya DPU imya Shamyakina*, 2011, No. 3, pp. 55–60.
- Rosell J.A., Bark thickness across the angiosperms: More than just fire, *New Phytologist*, 2016, Vol. 211, pp. 90–102.
- Shevelev S.L., Formirovaniye kory u derev'ev listvennitsy sibirskoi (Bark formation in Siberian larch trees), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2016, No. 4, pp. 134–138.
- Shevelev S.L., Kucherenko A.N., Nekotoryye zakonomernyye svyazi razmernyykh kharakteristik kory listvennitsy sibirskoi v Khakasii (Some natural relations of the dimensional characteristics of the bark of Siberian larch in Khakassia). In: *Listvennitsa: problemy kompleksnoi pererabotki* (Larch: problems of complex processing), Krasnoyarsk: SibTI, 1989, pp. 12–17.
- Shevelev S.L., Smol'yanov A.S., Krasikov I.I., Batvenkina T.V., Zakonomernosti formirovaniya kory u stvolov sosny kedrovoy sibirskoi (Regularities of bark formation in stems of Siberian cedar pine), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2015, Vol. 33, No. 3–4, pp. 135–138.
- Shevelev S.L., Smol'yanov A.S., Krasikov I.I., Bratilova N.P., Formirovaniye kory u stvolov pikhty sibirskoi (*Abies sibirica* Ledeb.) v tsentral'noi chasti Srednei Sibiri (Formation of stem bark of Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) in the central part of Central Siberia), *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2017, Vol. 149, No. 3, pp. 72–78.
- Shevelev S.L., Taksatsiya lesa. Taksatsiya kory lesoobrazuyushchikh porod Sibiri (Forest taxation. Taxation of the bark of forest-forming species of Siberia), Krasnoyarsk: SibGU im. M.F. Reshetneva, 2023, 44 p.
- Sofronov M.A., Volokitina A.V., Ob ekologicheskikh osobennostyakh zony severnykh redkolesii v Srednei Sibiri (On the ecological features of the zone of northern woodlands in Central Siberia), *Sibirskii ekologicheskii zhurn.*, 1998, No. 3–4, pp. 245–250.
- Sonmez T., Keles S., Tilki F., Effect of aspect, tree age and tree diameter on bark thickness of *Picea orientalis*, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2007, Vol. 22, pp. 193–197.
- Stangle S.M., Sauter U.H., Dormann C.F., Comparison of models for estimating bark thickness of *Picea abies* in South-west Germany: The role of tree, stand, and environmental factors, *Annals of Forest Science*, 2017, Vol. 74, Article 16.
- Tyulina L.N., K evolyutsii rastitel'nogo pokrova predgorii Yuzhnogo Urala (On the evolution of the vegetation cover of the foothills of the Southern Urals), *Zapiski Zlatoustovskogo obshchestva kraevedeniya*, 1929, No. 1, pp. 1–18.
- Usoltsev V.A., Modelirovaniye struktury i dinamiki fitomassy drevostoev (Modeling of the structure and dynamics of phytomass of stands). Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyarskogo un-ta, 1985, 191 p., available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3353>
- Usoltsev V.A., Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia, Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020, available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649>
- Vais A.A., Tolshchina kory nizhnei chasti derev'ev eli sibirskoi (*Picea sibirica*) v usloviyakh Srednei Sibiri (The thickness of the bark of the lower part of Siberian spruce trees (*Picea sibirica*) in the conditions of Central Siberia), *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo un-ta. Seriya Estestvennyye i tekhnicheskie nauki*, 2010, No. 8 (113), pp. 60–63, available at: <https://elibrary.karelia.ru/book.shtml?id=23121#t20c>
- Vais A.A., Tolshchina kory nizhnei chasti derev'ev sosny obyknovЕННОй (*Pinus sylvestris* L.) v usloviyakh Srednei Sibiri (The thickness of the bark of the lower part of the trees of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the conditions of Central Siberia), *Vestnik KrasGAU*, 2009, No. 7, pp. 44–47.
- Valipour A., Namiranian M., Etemad V., Ghazanfari H., Relationships between diameter, height and geographical aspects with bark thickness of Lebanon oak tree (*Quercus libani* Olive.) in Armardeh, Baneh (Northern Zagros of Iran), *Research Journal of Forestry*, 2009, Vol. 3, No. 1, pp. 1–7.
- Vasil'ev A.S., Kruglye lesomaterialy kak predmet truda pri grup-povoi okorke (Round timber as an object of labor in group debarking), *Inzhenernyi vestnik Dona*, Issue 5, Rostov-On-Don, 2012, available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1398> (April 10, 2023).
- Verzunov A.I., Vliyaniye pochvenno-gruntovykh uslovii na formirovaniye kornevykh sistem sosny i listvennitsy v stepnykh borakh Kazakhstana (Influence of soil and ground conditions on the formation of root systems of pine and larch in the steppe forests of Kazakhstan), *Ekologiya*, 1986, No. 5, pp. 69–71.
- Vines R.G., Heat transfer through bark and the resistance of trees to fire, *Australian Journal of Botany*, 1968, Vol. 16, pp. 499–514.
- Voropanov P.V., Opredeleniye ob"ema stvola bez kory u rastushchego dereva (Determining the volume of a trunk without bark in a growing tree), *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*, 1982, No. 5, pp. 20–23.
- Warren W.G., Record of preplanned and spontaneous discussions concerning the paper by Furnival G.M. and Wilson R.W. "Systems of equations for predicting forest growth and yield", *Statistical Ecology*, 1971, Vol. 3, pp. 56–57.
- Williams V.L., Witkowski E.T.F., Balkwill K., Relationship between bark thickness and diameter at breast height for six tree species used medicinally in South Africa, *South African Journal of Botany*, 2007, Vol. 73, pp. 449–465.
- Williams V.L., Witkowski E.T.F., Balkwill K., Height, branch-free bole length and bark thickness for six tree species used medicinally in South Africa, *Koedoe*, 2005, Vol. 48, pp. 57–65.
- Yilmaz E., Ozdemir E., Makineci E., Bark thickness models for oak forests being converted from coppice to high forests in Northwestern Turkey, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, Vol. 193, Article 728.
- Zakharov V.K., Tablitsy ob"ema i sbega malomernyykh stvolov sosny i metodika ikh sostavlениya (Tables of volume and taper of small-sized pine trunks and methods of their designing). In: *Sbornik nauchnykh trudov, Belorusskii lesotekhnicheskii institut imeni S.M. Kirova*, Minsk: Izd-vo BGU, 1956, No. 8, pp. 40–55.
- Zeng W.S., Developing tree biomass models for eight major tree species in China. In: *Biomass volume estimation and valorization for energy*. Chapter 1. Intech Publ., 2017, pp. 3–21.