

Научная статья
УДК 630*23

МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛИСТВЕННОСТИ СИБИРСКОЙ В ЭКОТОНЕ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ПОЛЯРНОМ УРАЛЕ

Екатерина Антоновна Костоусова¹, Юлия Олеговна Сайко²,
Сергей Павлович Паршин³, Егор Михайлович Агапитов⁴

¹⁻⁴ Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

¹ kostousova-katya@mail.ru

² julia.saiko.elk@ya.ru

³ psp@m.usfeu.ru

⁴ agapitovem@m.usfeu.ru

Аннотация. Исследованы закономерности зависимости диаметра ствола у шейки корня от радиуса кроны, использованы данные прямых измерений 886 экз. лиственницы сибирской. В исследовании были получены модели, основанные на методах машинного обучения, а также нелинейная регрессионная модель ($R^2 \geq 0,960$).

Ключевые слова: математико-статистические модели, верхняя граница леса, Полярный Урал, *Larix Sibirica* Ledeb

Благодарности: работа выполнена за счет средств гранта РНФ № 24-24-00235.

Для цитирования: Математико-статистические модели зависимости биометрических показателей лиственницы сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности на Полярном Урале / Костоусова Е. А., Сайко Ю. О., Паршин С. П., Агапитов Е. М. // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России = Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia : материалы XXII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. С. 1217–1220.

Original article

MATHEMATICAL AND STATISTICAL MODELS OF THE DEPENDENCE OF BIOMETRIC INDICATORS OF SIBERIAN LARCH IN THE ECOTONE OF THE UPPER WOODY VEGETATION BOUNDARY IN THE POLAR URALS

**Ekaterina A. Kostousova¹, Yulia O. Sayko²,
Sergey P. Parshin³, Egor M. Agapitov⁴**

¹⁻⁴ Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

¹ kostousova-katya@mail.ru

² julia.saiko.elk@ya.ru

³ psp@m.usfeu.ru

⁴ agapitovem@m.usfeu.ru

Abstract. The patterns of dependence between trunk diameter at the root collar and crown radius were researched, using direct measurements of 886 Siberian larch specimens. The research obtained models based on machine learning methods, as well as a nonlinear regression model ($R^2 \geq 0.960$).

Keywords: mathematical and statistical models, upper forest boundary, Polar Urals, *Larix Sibirica* Ledeb

Acknowledgments: the work was supported by grant from the Russian Science Foundation (project No. 24-24-00235).

For citation: Matematiko-statisticheskie modeli zavisimosti biometricheskix pokazatelej listvennicy sibirskoj v e`kotine verxnej granicy drevesnoj rastitel`nosti na Polyarnom Urale [Mathematical and statistical models of the dependence of biometric indicators of siberian larch in the ecotone of the upper woody vegetation boundary in the Polar Urals] (2026) E. A. Kostousova, Yu. O. Sayko, S. P. Parshin, E. M. Agapitov. Nauchnoe tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii [Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia] : materials of the XXII All-Russian (national) Scientific and Technical Conference of undergraduate and postgraduate students. Ekaterinburg : USFEU, 2026. P. 1217–1220. (In Russ).

Установленная по результатам многочисленных исследований экспансия древесной растительности в горную тундру обусловлена потеплением климата, происходящего с XX в. по настоящее время [1]. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для дистанционного зондирования окружающей среды позволяет получать сведения о различных объектах с высокой детализацией на ранее недоступном уровне традиционных методов. Объединение данных наземных исследований с результатами дистанционного мониторинга, осуществляемого с помощью БПЛА, существенно расширяет возможности анализа закономерностей пространственного

размещения лиственницы сибирской в экотоне верхней границы древесной растительности (Полярный Урал).

Наземные данные были получены в ходе работы на девяти круговых пробных площадях радиусом 11 м. На пробных площадях проводили измерение биометрических характеристик всех экземпляров лиственницы сибирской [2]. Измерения включали следующие параметры: координаты каждого древесного растения; высота ствола; диаметр ствола у шейки корня (D_r); для деревьев, превышающих данный порог, диаметр ствола на высоте 1,3 м (D_{bh}); измерения кроны в горизонтальной проекции по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Качество построенных моделей оценивали с применением стандартных метрик: коэффициента детерминации (R^2), среднеквадратичной ошибки (MSE), среднеквадратичного отклонения (RMSE) и средней абсолютной ошибки (MAE).

Моделирование проводили на массиве данных из 886 пар значений, который был случайным образом разделен на обучающую (70 %) и тестовую (30 %) выборку для валидации результатов. Расчет метрик для тестовой выборки выполнялся с помощью специализированного пакета Metrics [3]. Расчет метрик для тестовой выборки выполняли с использованием библиотек и языка программирования R в одноименной программной среде.

Значение коэффициента детерминации для ансамбля моделей составляет 0,968, модели «случайный лес» – 0,967, нелинейной регрессионной модели – 0,960. Результаты сравнительного анализа продемонстрировали, что метод машинного обучения «случайный лес», а также ансамбль моделей обеспечивают более высокую количественную адекватность по сравнению с таковой при применении моделей нелинейной регрессии.

Ключевым ограничением рассмотренных моделей машинного обучения, включая ансамбль моделей, является низкая прогностическая способность за пределами обучающей выборки. По этому показателю нелинейная регрессионная модель превосходит модели, основанные на методе машинного обучения. Поэтому для оценки значений диаметра ствола у шейки корня (используется как входной параметр в уравнениях комплексной оценки фитомассы лиственницы сибирской) предпочтительнее использовать нелинейную регрессионную модель следующего вида:

$$y = 13,463x^{1,185}, \quad R^2 = 0,960.$$

Идентификация отдельных экземпляров лиственницы сибирской на аэрофотоснимках, полученных с использованием БПЛА, а также комплексный анализ радиуса крон с применением соответствующих уравнений (R) и формул для интегральной оценки фитомассы [4, 5] открывают возможности для количественной оценки фитомассы и содержания углерода всех деревьев лиственницы в экотоне района исследований.

Список источников

1. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century / S. G. Shiyatov, M. M. Terent'ev, V. V. Fomin, N. E. Zimmermann // Russ. J. Ecol. 2007. № 38. P. 223–227. DOI: 10.1134/S1067413607040017
2. Reconstruction of the Expansion of Siberian Larch into the Mountain Tundra in the Polar Urals in the 20th-Early 21st Centuries / V. Fomin, A. Mikhailovich, D. Golikov, E. Agapitov // Forests. 2022. Vol. 13, № 3. DOI: 10.3390/f13030419
3. Carbon Storage by Siberian Larch in the Upper Treeline Ecotone in the Polar Urals / A. P. Mikhailovich, V. V. Fomin, D. Yu. Golikov [et al.] // Russian Journal of Ecology. 2025. Vol. 56. № 3. P. 200–207. DOI: 10.1134/S1067413624603695
4. Мазепа В. С., Шиятов С. Г. Динамика верхней границы леса на Полярном Урале в связи с изменениями климата // Вопросы географии: Исследования гор. Горные регионы северной Евразии. Развитие в условиях глобальных изменений. 2014. Vol. 137. P. 290.
5. Climate change evidence in tree growth and stand productivity at the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains / N. M. Devi, V. V. Kukarskih, A. A. Galimova [et al.] // For. Ecosyst. 2020. № 7. DOI: 10.1186/s40663-020-0216-9