

МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДНЕЙ ВЫСОТЫ ДРЕВОСТОЕВ ДВУХВОЙНЫХ СОСЕН (ПОДРОД *PINUS* L.) В КЛИМАТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТАХ ЕВРАЗИИ

В.А. Усольцев^{1, 2*}, И.С. Цепордей²

¹ Уральский государственный лесотехнический университет
и ² Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия

* Эл. почта: Usoltsev50@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.01.2023; принята к печати 22.05.2023

В связи с изменением климата и попытками его стабилизации путем включения динамики биомассы управляемых лесов в углеродный цикл возрастает роль легко измеряемых показателей, достаточно адекватно отражающих биологическую продуктивность древостоев. Известно, что из всех таксационных показателей наиболее тесно коррелирует с продуктивностью высота древостоя. Однако моделирование высоты древостоя в климатических градиентах выполняется сегодня лишь на региональных уровнях в узких диапазонах климатических переменных, учитываемых порознь при игнорировании их совместного эффекта, а также без учета возрастной и ценотической структуры древостоев. В итоге обнаруживается очень слабая связь высоты древостоя с климатическими переменными или ее полное отсутствие. Мы попытались выяснить, насколько возрастает информативность климатических переменных при объяснении варьирования средней высоты древостоев, если расширить диапазон климатических переменных до трансконтинентального уровня. С использованием материалов 2390 определений средней высоты естественных древостоев и культур двухвойных сосен (подрод *Pinus* L.) из авторской базы данных мы разработали модель изменения средней высоты в связи с территориально распределенными температурами и осадками на территории Евразии, значимую на уровне $p < 0,001$. Впервые выявлено действие закона лимитирующего фактора (закон Либиха-Шелфорда) на трансконтинентальном уровне: в регионах достаточного увлажнения в качестве фактора, лимитирующего рост древостоя, выступает недостаток тепла, а по мере продвижения в регионы недостаточного увлажнения происходит смена лимитирующего фактора, коим становится избыток тепла. Установлено, что таксационные показатели объясняют 86%, а климатические переменные – около 11% изменчивости высоты древостоя. При прочих равных условиях средняя высота культур сосны выше, чем естественных древостоев, на 5%. Применив к полученной модели принцип пространственно-временного замещения, мы показали, что при предполагаемом повышении январской температуры на 1 °C средняя высота древостоев в условиях достаточного увлажнения может повыситься на 1–3%, а в условиях недостаточного увлажнения – снизиться на 0,5–1,6%. Соответственно, в случае снижения среднегодовых осадков на 20 мм в районах недостаточного теплообеспечения средняя высота может увеличиться на 0,9–2,9%, а в регионах достаточного теплообеспечения – снизиться на 0,6–1,7%.

Ключевые слова: высота древесного полога, закон Эйхгорна, закон лимитирующего фактора Либиха-Шелфорда, градиенты температур и осадков, принцип пространственно-временного замещения.

MODELING THE AVERAGE HEIGHT OF STANDS OF TWO-NEEDED PINES (SUBGENUS *PINUS* L.) IN CLIMATIC GRADIENTS OF EURASIA

V.A. Usoltsev^{1, 2*}, I.S. Tsepordey²

¹ Ural State Forest Engineering University and ² Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

* Email: Usoltsev50@mail.ru

Due to climate changes and the attempts to stabilize it by including the biomass of managed forests in the carbon cycle, the role of easily measurable indicators that adequately reflect the biological productivity of stands is increasing. It is known that, among taxation indicators, stand height correlates most tightly with productivity. However, modeling the height of a stand in climatic gradients is being carried out currently only at regional levels within narrow ranges of climatic variables, which are taken into account separately while ignoring their combined effect as well as the age and cenotic structure of stands. As a result, the apparent correlations between stand heights and climatic variables are weak or absent. We attempted to find out how much the ability of climatic variables to explain the variation in the average height of stands is increased when the range of climatic variables is expanded up to the transcontinental level. We used the results of 2390 measurements of the average height of natural stands and plantations of two-needled pines (subgenus *Pinus* L.) obtained from the original authors' database. A model of changes in the average tree height over geographically distributed temperatures and precipitation levels in Eurasia has been developed, its significance level

corresponding to $p < 0.001$. For the first time, the effect of the Liebig-Shelford law of limiting factor was revealed at the transcontinental level: in the regions of a sufficient moisture, the lack of heat is the limiting factor of stand growth, whereas upon the transition to the regions of insufficient moisture, the limiting factor changes to heat excess. It was found that taxation indicators and climatic variables explain 86% and about 11%, respectively, of stand height variability. Anything else being equal, the average height of pine plantations is 5% above that of the natural stands. By applying the principle of space-for-time substitution to the model, we showed that, with an expected increase in January temperature by 1 °C, the average height of stands can increase by 1–3% in conditions of sufficient moisture and decrease by 0.5–1.6% in conditions of insufficient moisture. Accordingly, in the case of a decrease in average annual precipitation by 20 mm, the average height may increase by 0.9–2.9% in the areas of insufficient heat supply and decrease by 0.6–1.7% in the areas of sufficient heat supply.

Keywords: tree stand height, Eichhorn law, the Liebig-Shelford law of limiting factor, temperature and precipitation gradients, the principle of space-for-time substitution.

Введение

Понимание последствий изменения климата для роста деревьев необходимо для точного прогнозирования динамики лесов в будущих сценариях изменения климата [12]. В связи с изменением климата и попытками его стабилизации путем включения динамики фитомассы управляемых лесов в углеродный цикл возрастает роль легко измеряемых показателей, достаточно адекватно отражающих биологическую продуктивность древостоев. Известно, что из всех таксационных показателей в наиболее тесной корреляционной связи с продуктивностью находится высота древостоя [3, 7, 8].

Более 100 лет назад Ф. Эйхгорном при анализе связи запаса древостоев пихты с их высотой в разных классах бонитета было установлено, что запас является функцией высоты независимо от возраста и класса бонитета и что одной определенной высоте для всех классов бонитета соответствует один и тот же запас древостоя [17]. Затем этот же вывод был подтвержден для бука [18], а также для ели и сосны [20], и эта общая закономерность получила известность как расширенный закон Эйхгорна [9, 36]. Однако позднее разными авторами было доказано, что закон Эйхгорна не является всеобщим и дает смещения как в лучших, так и в худших условиях произрастания [9, 21, 25].

Несмотря на интенсивное развитие методов дистанционного зондирования лесного покрова, сохраняются неопределенности при оценке высоты полога на уровне как отдельного древостоя [22], так и лесного региона [30]. Глобальная база данных [34] дает оценки высоты полога лесных экосистем с помощью спутникового лидара GLAS с разрешением 1 км², что на несколько порядков превышает размер наземных пробных площадей, и это существенно усложняет калибровку данных дистанционного зондирования. Показано, что названная база дает завышение оценок небольших высот и занижение больших высот полога [42]. Сопоставление оценок высоты полога с помощью имеющихся сегодня нескольких систем лидарного космического зондирования показывает наличие расхождений в оценках до 3 м [35]. Однако на уровне местообитания (пробной площади) определение вы-

сот деревьев и древостоя с необходимой точностью не представляет проблемы, особенно с использованием воздушного лидарного зондирования с применением БПЛА (дронов) [31], а также – наземного лидарного сканирования [29].

Исследования показали, что в результате глобального изменения климата рост деревьев в высоких широтах положительно связан с повышением температуры [14, 15, 24], в более низких широтах повышенный дефицит воды, связанный с увеличением температуры, приводит к снижению роста деревьев [10, 16, 26, 33], а в засушливых районах происходит их интенсивное отмирание [32]. Однако исследование роста деревьев в высоту, выполненное на 16 видах Северной Америки по данным инвентаризации 37 тыс. насаждений, заложенных в период с 1600 по 1968 год, напротив, показало снижение роста некоторых видов в более высоких широтах и горах, что, возможно, было связано с повышением не температуры, а осадков, а во внутренних районах – с засухами [28]. По-видимому, во многих случаях происходит как взаимовлияние, так и замещение одного климатического фактора другим [5].

По материалам 300 тыс. пробных площадей, заложенных на территории Европы в различных растительных сообществах, в том числе лесных, полученных в «Европейском архиве растительности» [13], были проанализированы в климатических градиентах Европы несколько характеристик растительных сообществ, в том числе высота древостоев. В результате было установлено полное отсутствие связи высоты древостоев с климатическими градиентами Европы [23]. Анализ связи высоты деревьев с климатическими показателями на территории мерзлотных лиственничных лесов северо-восточной Азии без учета варьирования возрастной и ценотической структуры древостоев показал, что названная связь с температурой объясняет от 0,5 до 16%, а связь с годовыми осадками – лишь 7% варьирования высоты деревьев [30].

Поскольку известно, что высота древостоев имеет положительную связь с возрастом и отрицательную – с их густотой [6], анализ связи высоты древостоев с климатическими градиентами необходимо выполнять с учетом варьирования возрастной и ценотической

структуры древостоев. В целом, на глобальном уровне характер увеличения или снижения темпов роста деревьев и древостоев в связи с изменением климата все еще неясен [28].

В большинстве упомянутые исследования были выполнены на том или ином региональном уровне в сравнительно узких диапазонах климатических градиентов, причем влияние климатических факторов оценивалось порознь, а при одновременном учете, например, температур и осадков не учитывалось их взаимодействие (взаимовлияние, совместный эффект) [44]. Классический регрессионный анализ предполагает наличие ортогональности независимых переменных. В модели наземной фитомассы лиственницы на территории Китая [44] предполагалась подобная ортогональность действия температур и осадков. В реальных же условиях ортогональность природой не соблюдается, и температура с осадками действуют на продуктивность во взаимной связи и аддитивно [40].

Известно, что основной характеристикой адекватности регрессионной модели эмпирическим данным является коэффициент детерминации, который, в свою очередь, определяется соотношением общей и остаточной дисперсий. При одной и той же остаточной дисперсии адекватность модели тем выше, чем больше общая дисперсия. Если в наших примерах общая дисперсия определяется величиной диапазона климатических градиентов, то, чем меньше названные диапазоны, тем больше размер общей дисперсии приближается к размеру остаточной, а коэффициент детерминации соответственно стремится к нулю.

Ввиду изложенного возникает вопрос: какой степени адекватности регрессионной модели, описывающей зависимость высоты древостоя от климатических факторов, можно достичь при расширении их диапазона до трансконтинентального уровня при учете их совместного действия, а также возрастной и ценотической изменчивости древостоев. Расширение района исследования до трансконтинентального уровня предполагает включение в наш анализ не одного древесного вида, а совокупности видов, викарирующих в пределах рода (подрода) на территории континента.

Соответственно, в работе были поставлены следующие задачи:

- разработать модели изменения средней высоты естественных древостоев и культур двухвойных сосен (подрод *Pinus* L.) в связи с территориально распределенными данными температур и осадков на территории Евразии с учетом варьирования таксационных показателей древостоев;
- установить вклад определяющих факторов в объяснение изменчивости средней высоты древостоев;
- показать возможные изменения средней высоты древостоев в связи с предполагаемыми сдвигами температур и осадков.

Материалы и методы исследования

Для реализации поставленных задач исследования из сформированной ранее базы данных в количестве 8450 определений [37] были отобраны 2390 пробных площадей с данными о таксационных показателях древостоев двухвойных сосен, викарирующих в пределах подрода *Pinus* L. на территории Евразии. Данные о таксационных показателях были получены путем перечислительной таксации, включая 1640 естественных древостоев и 750 культур. Основной массив исходной информации представлен сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), данные о которой относятся в основном к территории России, Украины, Белоруссии и Северного Казахстана, в меньшей степени – к территории Северной и Западной Европы. Менее всего представлены *P. densiflora* S. & Z., *P. taeda* L., *P. thunbergii* Parl. в Японии, *P. nigra* Arn. в Великобритании и Болгарии и *P. tabuliformis* Carr. в Китае.

Положение пробных площадей по имеющимся координатам нанесено на карты-схемы территориального распределения средних температур января и среднегодовых осадков, и составлена матрица таксационных показателей древостоев, соотнесенных с климатическими показателями карт-схем [41]. Обоснование использования зимней, а не среднегодовой, температуры было дано ранее [38]. Обработка экспериментального материала выполнена по программе многофакторного регрессионного анализа Statgraphics-19 (<http://www.statgraphics.com/>).

Результаты и их обсуждение

На основании вышеизложенного в структуру регрессионной модели в качестве определяющих (объясняющих варьирование) факторов введены средняя температура января, средние годовые осадки, комбинированная переменная, опосредующая совместный эффект температур и осадков, а из таксационных показателей – возраст древостоя и его густота в качестве ценотического фактора, а также бинарная переменная [2], характеризующая принадлежность исходных данных к естественным древостоям или культурам. Мы применили, таким образом, структуру модели смешанного типа (mixed effect model), включающей в качестве определяющих факторов как численные, так и бинарные переменные [1, 18, 43]. Поскольку в природных системах преобладают нелинейные связи, а линейность является лишь частным случаем [4], нами применена степенная функция в логарифмической линейнизации с поправкой на ее ретрансформацию [27].

В результате регрессионного анализа исходных данных получена следующая регрессионная модель:

$$\begin{aligned} \ln H = & 10,9635 + 2,2521 \ln A - 0,2506(\ln A)^2 - \\ & - 0,2701 \ln N + 0,0435 X - 3,5594 \ln(T + 50) - \\ & - 2,2400 \ln P + 0,6091 [\ln(T + 50)(\ln P)]; \end{aligned} \quad (1)$$

adjR² = 0,805; SE = 0,28,

где H – средняя высота древостоя, м; A – возраст, лет; N – число деревьев, 1000/га; T – средняя температура января, °С; P – средние годовые осадки, мм; X – бинарная переменная, равная 0 для естественных древостоев и 1 – для культур; $[\ln(T + 50)(\ln P)]$ – комбинированная переменная, характеризующая совместное действие температур и осадков; $\text{adj}R^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных; SE – стандартная ошибка модели. Для коррекции свободного члена модели (1) введена поправка 0,041 [11]. Модель (1) действительна в диапазонах средней высоты от 1,5 до 36 м, возраста от 4 до 380 лет, густоты от 100 до 145000 деревьев на 1 га, температуры января от – 30 до +10 °С и осадков от 190 до 890 мм.

Все регрессионные коэффициенты модели, за исключением бинарной переменной X , значимы на уровне $p < 0,001$. О степени адекватности модели (1) можно судить по соотношению эмпирических и расчетных значений высоты древостоев (рис. 1). Распределение вкладов определяющих факторов в объяснение изменчивости средней высоты древостоев показано в табл. 1.

Табл. 1

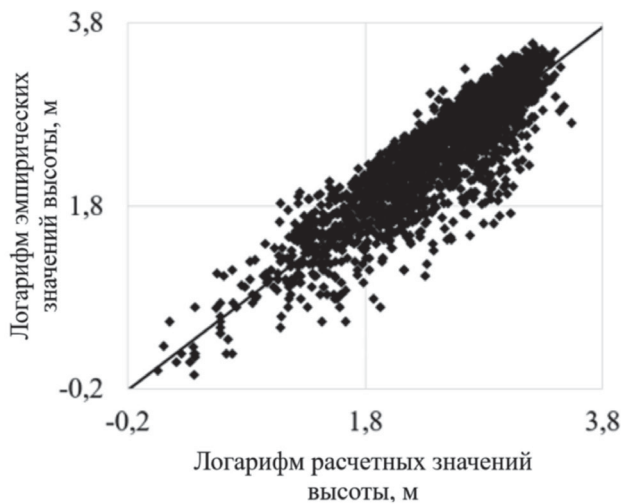


Рис. 1. Соотношение эмпирических и расчетных значений высоты древостоев согласно модели (1)

Вклад членов регрессии модели (1) в объяснение изменчивости средней высоты древостоев, %

Члены регрессии	Вклад членов регрессии в объяснение изменчивости средней высоты, %
$\ln A, (\ln A)^2$	57,6
$\ln N$	28,7
X	2,8
$\ln(T + 50)$	3,4
$\ln P$	3,8
$[\ln(T + 50)(\ln P)]$	3,7

Согласно табл. 1, наибольший вклад (86%) в объяснение изменчивости средней высоты древостоев вносят их таксационные показатели, характеризующие эдафические и ценогические условия произрастания, а вклад климатических переменных в совокупности составляет около 11%. При преобладающем вкладе таксационных показателей вполне объяснимо, почему при их игнорировании в структуре модели одни лишь климатические переменные объясняют от 0,5 до 16% изменчивости средней высоты [30]. Вклад происхождения древостоев в объяснение упомянутой изменчивости невелик (около 3%), тем не менее, бинарная переменная X значима на уровне $p < 0,01$ ($t = 3,1 > t_{99} = 2,58$). Положительный знак регрессионного коэффициента при бинарной переменной означает, что при прочих равных условиях средняя высота культур сосны выше, чем в естественных древостоях. Это превышение составляет около 5%.

Затем мы протабулировали модель (1) в диапазонах задаваемых температур от – 30 до +10 °С и осадков – от 190 до 890 мм при среднем возрасте 53 года и средней густоте 3,7 тыс. экз./га, и результат представили в виде 3D-поверхности пропеллерообразной формы (рис. 2). Рис. 2 построен для естественных сосняков, а для культур его конфигурация остается неизменной со сдвигом вверх по оси абсцисс на 5%. На рис. 2 можно видеть две оптимальных и две пессимальных ситуации. Оптимальные ситуации (наибольшие значения средней высоты) имеют место при максимальных осадках и максимальных температурах (16 м), а также при минимальных осадках и минимальных температурах (15 м). Пессимальные ситуации (наименьшие значения высоты) видим при максимальных осадках и минимальных температурах (9 м), а также при минимальных осадках и максимальных температурах (10 м).

Таким образом, нами установлено действие закона лимитирующего фактора Либиха-Шелфорда [5] на трансконтинентальном уровне: в регионах достаточного увлажнения лимитирующим рост фактором является недостаток тепла, а по мере продвижения в регионы недостаточного увлажнения происходит смена лимитирующего фактора, коим становится избыток тепла.

Далее, используя принцип пространственно-временного замещения, ранее реализованный нами на примерах моделей надземной биомассы деревьев и древостоев двухвойных сосен [39], мы показываем, насколько изменится средняя высота древостоев при предполагаемом увеличении средней январской температуры на 1 °С при неизменных осадках (рис. 3), и насколько изменится средняя высота при возможном снижении среднегодовых осадков на 20 мм при неизменной температуре (рис. 4).

Мы видим на рис. 3, что при повышении январской температуры на 1 °С при неизменных осадках средняя

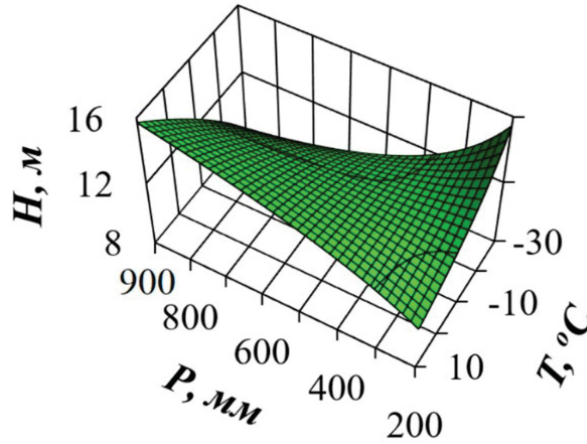


Рис. 2. Результат табулирования модели (1) по задаваемым значениям температур и осадков при средних значениях возраста 53 года и средней густоте 3,7 тыс. экз./га

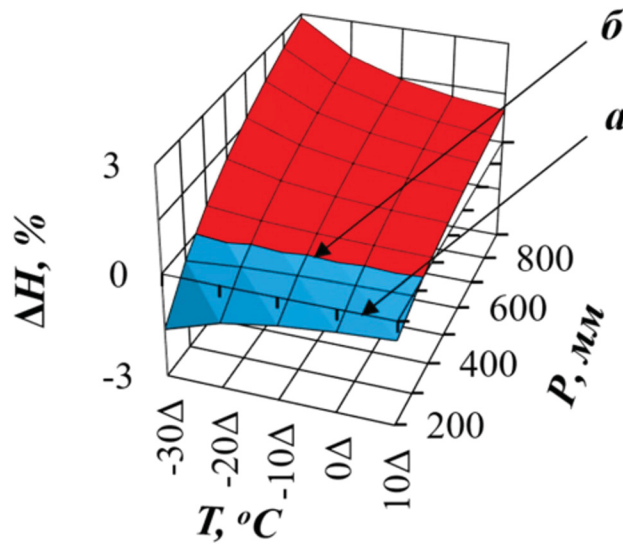


Рис. 3. Расчетное изменение средней высоты древостоев (ΔH , %) при предполагаемом увеличении среднеянварской температуры на 1°C при неизменных осадках. Здесь и далее: *a* – плоскость нулевого приращения ΔH ; *б* – линия, на которой положительные приращения ΔH (красный цвет) сменяются отрицательными (синий цвет)

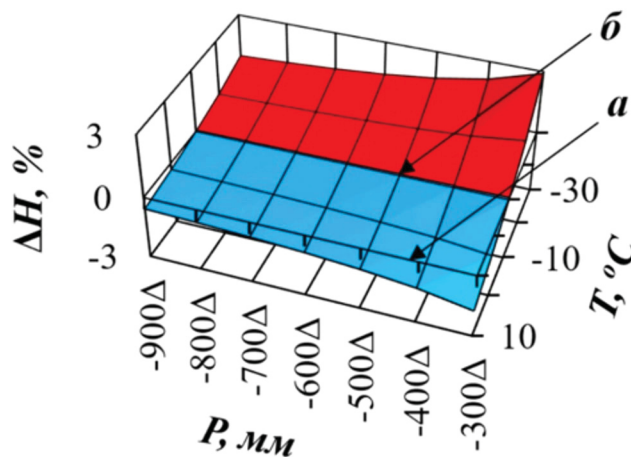


Рис. 4. Расчетное изменение средней высоты древостоев (ΔH , %) при предполагаемом снижении среднегодовых осадков на 20 мм при неизменной температуре

высота древостоев в условиях достаточного увлажнения повышается на 1–3%, а в условиях недостаточного увлажнения снижается на 0,5–1,6%. Соответственно, рис. 4 показывает, что в случае снижения среднегодовых осадков на 20 мм при неизменной температуре в районах недостаточного теплообеспечения средняя высота увеличивается на 0,9–2,9%, а в регионах достаточного теплообеспечения – снижается на 0,6–1,7%.

Заключение

Таким образом, в нашей работе устранены неопределенности, связанные с моделированием высоты древостоев в климатических градиентах на региональных уровнях. Расширив градиенты температур и осадков до трансконтинентального уровня с учетом совместного эффекта температур и осадков, а также возрастной и ценотической структуры древостоев, мы получили адекватную эмпирическую модель изменения средней высоты естественных древостоев и культур двухвойных сосен (подрод *Pinus* L.) в связи с территориально распределенными данными температур и осадков на территории Евразии.

Впервые выявлено действие закона лимитирующего фактора Либиха-Шелфорда на трансконтинентальном уровне: в регионах достаточного увлажнения в качестве фактора, лимитирующего рост древостоя, выступает недостаток тепла, а по мере продвижения в регионы недостаточного увлажнения происходит смена лимитирующего фактора, коим становится избыток тепла.

Установлено, что наибольший вклад (86%) в объяснение изменчивости средней высоты древостоев вносят их таксационные показатели, характеризующие эдафические и ценотические условия произрастания, а вклад климатических переменных в совокупности составляет около 11%. Вклад происхождения древостоев в объяснение упомянутой изменчивости составляет около 3%, и при прочих равных условиях средняя высота культур сосны выше, чем в естественных древостоях, на 5%.

На основе принципа пространственно-временного замещения показано, что при предполагаемом повышении январской температуры на 1 °С при неизменных осадках средняя высота древостоев в условиях достаточного увлажнения повышается на 1–3%, а в условиях недостаточного увлажнения снижается на 0,5–1,6%. Соответственно, в случае снижения среднегодовых осадков на 20 мм при неизменной температуре в районах недостаточного теплообеспечения средняя высота может увеличиться на 0,9–2,9%, а в регионах достаточного теплообеспечения – снизиться на 0,6–1,7%.

Темпоральные прогнозы изменения средней высоты сосняков имеют предварительный характер, поскольку неизвестно, насколько адаптационные способности видов двухвойных сосен, викарирующих в пределах Евразии, сложившиеся в течение тысячелетий в территориальных градиентах температур и осадков, сохранятся при нынешних быстротечных темпоральных изменениях климатических показателей.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Бубырь ДС, Клячкин ВН, Карпунина ИН. Использование бинарных переменных при регрессионном моделировании состояния технического объекта. Изв Самарск научн центра РАН. 2014;16(2):371-3.
2. Дрейпер Н, Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика; 1973.
3. Загребев ВВ, Брук БЛ, Загребева АИ. Единые бонитировочные шкалы для оценки продуктивности сосновых и еловых насаждений. Современное лесоустройство и таксация леса. Сб. научных трудов ВНИИЛМ. 1974;4:126-57.
4. Леонтьев НЛ. Техника статистических вычислений. М.: Лесная промышленность; 1966.
5. Розенберг ГС, Рянский ФН, Лазарева НВ и др. Общая и прикладная экология. Самара-Тольятти: Изд-во Самар. гос. эконом. ун-та; 2016.

6. Рубцов ВИ, Новосельцева АИ, Попов ВК и др. Биологическая продуктивность сосны в лесостепной зоне. М.: Наука; 1976.
7. Свалов НН. Методы составления таблиц классов бонитета. Лесное хозяйство. 1967;6:46-9.
8. Свалов НН. Прогнозирование роста древостоев. Методы учета и прогноза лесных ресурсов. Сер. «Лесоведение и лесоводство». Т. 2. М.: ВИНТИ; 1978.

Общий список литературы/Reference List

1. Bubyr DS, Kliachkin VN, Karpunina IN. [The use of binary variables in regression modeling of the state of a technical object]. Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk. 2014;16(2):371-3. (In Russ.)
2. Draper N, Smith G. Prikladnoy Regressionnyy Analiz. Moscow: Statistika; 1973. (In Russ.)

3. Zagreyev VV, Brook BL, Zagreyeva AI. [Unified scales of site indices for assessing the productivity of pine and spruce plantations]. *Sovremennoe Lesoustroistvo i Taksatsiya Lesa*. 1974;4:126-57. (In Russ.)
4. Leontyev NL. *Tekhnika Statisticheskikh Vychisleniy*. Moscow: Lesnaya Promyshlennost; 1966. (In Russ.)
5. Rozenberg GS, Rianskiy FN, Lazareva NV et al. *Obshchaya i Prikladnaya Ekologia*. Samara-Togliatti: Izdatelstvo Samarskogo Gosudarstvennogo Ekonomicheskogo Universiteta; 2016. (In Russ.)
6. Rubtsov VI, Novoseltseva AI, Popov V et al. *Biologicheskaya Produktivnost Sosny v Lesostepnoy Zone*. Moscow: Nauka; 1976. (In Russ.)
7. Svalov NN. [Methods of compiling tables of site index classes]. *Lesnoye Khoziaystvo*. 1967;6:46-9. (In Russ.)
8. Svalov NN. [Forecasting the growth of stands. Methods of estimating and forecasting of forest resources]. In: *Seriya "Lesovedenie i Lesovodstvo"*. Tom 2. Moscow: VINITI; 1978. (In Russ.)
9. Assman E. Die Bedeutung des "erweiterten Eichhorn'schen Gesetzes" für die Kontrolle von Fichten Ertragstafeln. *Forstwissenschaftl Centralblt*. 1955;74:321-30.
10. Babst F, Poulter B, Trouet V et al. Site-and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. *Glob Ecol Biogeogr*. 2013;22:706-17.
11. Baskerville GL. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can J Forest Res*. 1972;2(1):49-53.
12. Brecka AFJ, Shahi C, Chen HYH. Climate change impacts on boreal forest timber supply. *Forest Policy Econ*. 2018;92:11-21.
13. Chytrý M, Hennekens SM, Jimenez-Alfar B et al. European Vegetation Archive (EVA): an integrated database of European vegetation plots. *Appl Veg Sci*. 2016;19:173-80.
14. Cienciala E, Altman J, Dolezal J et al. Increased spruce tree growth in Central Europe since 1960s. *Sci Total Environ*. 2018;619-620:1637-47.
15. Devi N, Hagedorn F, Moiseev P et al. Expanding forests and changing growth forms of Siberian larch at the Polar Urals treeline during the 20th century. *Glob Change Biol*. 2008;14:1581-91.
16. Dietrich R, Bell FW, Silva LCR et al. Climatic sensitivity, water-use efficiency, and growth decline in boreal jack pine (*Pinus banksiana*) forests in Northern Ontario. *J Geophys Res Biogeosci*. 2016;121:2761-74.
17. Eichhorn F. *Ertragstafeln für die Weißtanne*. Berlin; 1902.
18. Eichhorn F. Beziehungen zwischen Bestandeshöhe und Bestandesmasse. *Allg Forst und Jagdz*. 1904;80:45-9.
19. Freese F. *Linear regression methods for forest research*. USDA Forest Service. Res. Paper FPL 17. Madison; 1964.
20. Gerhardt E. Über Bestandes-Wachstumsgesetze und ihre Anwendung zur Aufstellung von Ertragstafeln. *Allg Forst und Jagdz*. 1909;85:117-28.
21. Gerhardt E. Zur Ertragstafelfrage: Eine dreiteilige Fichtenertragstafel. *Allg Forst und Jagdz*. 1928;104:377-86.
22. Hunter MO, Keller M, Victoria D, Morton DC. Tree height and tropical forest biomass estimation. *Biogeosciences*. 2013;10:8385-99.
23. Kambach S, Sabatini FM, Attorre F et al. Climate-trait relationships exhibit strong habitat specificity in plant communities across Europe. *Nat Commun*. 2023;14:712.
24. Kremenetski CV, Sulerzhitsky LD, Hantemirov R. Holocene history of the northern range limits of some trees and shrubs in Russia. *Arct Antarct Alp Res*. 1998;30:317-33.
25. Magin R. Möglichkeiten der dynamischen Bonitierung im Hinblick auf die künftige Einheitsbewertung. *Allg Forst Zeitschr*. 1955;10:122-4.
26. Martin-Benito D, Pederson N, Köse N et al. Pervasive effects of drought on tree growth across a wide climatic gradient in the temperate forests of the Caucasus. *Glob Ecol Biogeogr*. 2018;27:1314-25.
27. Mascaro J, Litton CM, Hughes RF et al. Is logarithmic transformation necessary in allometry? Ten, one-hundred, one-thousand times yes. *Biol J Linn Soc Lond*. 2014;111:230-3.
28. Messaoud Y, Reid A, Tchebakova NM et al. The historical complexity of tree height growth dynamic associated with climate change in Western North America. *Forests*. 2022;13:Article 738.
29. Meunier F, Moorthy SMK, Peaucelle M et al. Using terrestrial laser scanning to constrain forest ecosystem structure and functions in the Ecosystem Demography model (ED2.2). *Geosci Model Dev*. 2022;15(12):4783-803.
30. Miesner T, Herzschuh U, Pestryakova LA et al. Forest structure and individual tree inventories of northeastern Siberia along climatic gradients. *Earth Syst Sci Data*. 2022;14:5695-716.
31. Neuville R, Bates JS, Jonard F. Estimating forest structure from UAV-mounted LiDAR point cloud using machine learning. *Remote Sens*. 2021;13:Article 352.
32. O'Brien MJ, Engelbrecht BMJ, Joswig J et al. A synthesis of tree functional traits related to drought-induced mortality in forests across climatic zones. *J Appl Ecol*. 2017;54:1669-86.

33. Sangines de Carcer P, Vitasse Y, Penuelas J et al. Vapor-pressure deficit and extreme climatic variables limit tree growth. *Glob Change Biol.* 2018;24:1108-22.
34. Simard M, Pinto N, Fisher JB et al. Mapping forest canopy height globally with space borne lidar. *J Geophys Res.* 2011;116:G04021.
35. Sothe C, Gonsamo A, Lourenço RB et al. Spatially continuous mapping of forest canopy height in Canada by combining GEDI and ICESat-2 with PALSAR and Sentinel. *Remote Sens.* 2022;14:5158.
36. Thomasius H. Untersuchungen über die Brauchbarkeit einiger Wachstumsgrößen von Bäumen und Beständen für die quantitative Standortsbeurteilung. *Arch Forstwes.* 1963;12(12):1267-323.
37. Usoltsev VA. Forest Biomass and Primary Production Database for Eurasia: Digital Version. The third edition, enlarged. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2020. Available at: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/9648/1/Base_v2.xlsx
38. Usoltsev VA, Merganičová K, Konôpka B et al. Fir (*Abies* spp.) stand biomass additive model for Eurasia sensitive to winter temperature and annual precipitation. *Cent Eur For J.* 2019;65:166-79.
39. Usoltsev V, Zukow W, Tsepordey I. Climatologically determined spatial and temporal changes in the biomass of *Pinus* sp. of Eurasia in the context of the law of the limiting factor. *Ecol Quest.* 2022;33(1):15-23.
40. Wilschut RA, De Long JR, Geisen S et al. Combined effects of warming and drought on plant biomass depend on plant woodiness and community type: a meta-analysis. *Proc R Soc B.* 2022;289:20221178.
41. World Weather Maps; 2007. Available at: <https://www.mapsofworld.com/referrals/weather>.
42. Yang W, Kondoh A. Evaluation of «the Simard et al. 2011 Global Canopy Height Map» in boreal forests. *Remote Sens.* 2020;12:1114.
43. Zeng WS. Developing tree biomass models for eight major tree species in China. In: Biomass volume estimation and valorization for energy. Chapter 1. Intech Publ.;2017;3-21.
44. Zeng WS, Duo HR, Lei XD et al. Individual tree biomass equations and growth models sensitive to climate variables for *Larix* spp. in China. *Eur J Forest Res.* 2017;136:233-49.

