

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗИМНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ КЛИМАТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ БИОМАССЫ ЛЕСОВ ЕВРАЗИИ***И. С. Цепордей², В. А. Усолтцев^{1,2}, Д. В. Норитсин³**¹Уральский государственный лесотехнический университет
Российская Федерация, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37²Ботанический сад УрО РАН
Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а³ПАО «Сбербанк», Центр компетенций аналитики
Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Гоголя, 44
²ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>^{1,2}Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>³norritsin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1484-6384>

Понимание последствий изменения климата для роста деревьев необходимо для прогнозирования динамики лесов в будущих сценариях изменения климата. В этой связи возрастает роль эмпирических моделей, адекватно описывающих изменчивость биологической продуктивности лесов и позволяющих прогнозировать ее изменение под влиянием климатических сдвигов. В имеющихся публикациях вклад климатических переменных в объяснение изменчивости биомассы оказывается либо несущественным, либо нулевым, главным образом, вследствие регионального уровня моделей. Наше ранее выполненное на уровне Евразии моделирование биомассы деревьев и древостоев показало наличие статистически значимого вклада зимней температуры и среднегодовых осадков в объяснение изменчивости показателей биомассы. Однако в дальнейшем под вопрос была поставлена правомерность использования в прогностических моделях зимней температуры вместо летней. Цель настоящего исследования состояла в анализе взаимосвязи температур разных месяцев на территории Евразии и их изменения в широтном градиенте от тропиков до лесотундр с целью выявления месяца, средняя температура которого была бы статистически значимой в моделях биомассы. Для выполнения поставленной цели использована база климатических данных WorldClim версии 2.1 за 1970–2000 годы (<https://worldclim.org/data/index.html>). Установлено, что средняя летняя температура обеспечивает слабый территориально распределенный климатический сигнал, не способный к вычленению из общей дисперсии факторов, определяющих биомассу деревьев и древостоев. Напротив, средняя температура января представляет достаточно сильный территориально распределенный климатический сигнал благодаря высокому отношению общей дисперсии (или перепада температур) к остаточной, что обеспечило статистическую значимость выявленного ранее влияния зимних температур на биомассу деревьев и древостоев лесообразующих родов Евразии [4]. Среднегодовая температура, характеризующаяся высокой корреляцией с январской температурой, может оказаться статистически значимой при объяснении изменчивости биомассы деревьев и древостоев Евразии. Выявление данной предпосылки составит предмет наших дальнейших исследований.

Ключевые слова: прогнозирование биомассы лесов, климатические сигналы, средняя температура января и июля, среднегодовая температура.

*Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 3, P. 243–247***RATIONALE OF THE WINTER TEMPERATURE USE IN FORECASTING CLIMATE-RELATED CHANGES IN THE BIOMASS OF EURASIAN FORESTS****I. S. Tsepordey², V. A. Usoltsev^{1,2}, D. V. Noritsin³**¹Ural State Forest Engineering University
37, Siberian tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation²Botanical Garden of Ural Branch of RAS
202a, 8 Marta str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation³Sberbank PJSC, Analytics Competence Center
44, Gogol Str., Yekaterinburg, Russian Federation²ivan.tsepordey@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4747-5017>^{1,2}Usoltsev50@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4587-8952>³norritsin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1484-6384>

* Публикация подготовлена в рамках Государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

Understanding the effects of climate change on tree growth is necessary to predict forest dynamics in future climate change scenarios. In this regard, the role of empirical models that adequately describe the variability of biological productivity of forests and allow predicting its change under the influence of climatic shifts is increasing. In the available publications, the contribution of climate variables to the explanation of biomass variability is either insignificant or zero, mainly due to the regional level of models. The modeling of the biomass of trees and stands performed at the Eurasian level showed the presence of a statistically significant contribution of winter temperature and average annual precipitation to the explanation of the variability of biomass indicators. However, the validity of using winter temperature instead of summer one in predictive models was questioned. The purpose of this work was to study the relationship of temperatures of different months in Eurasia and their changes in the latitudinal gradient from the tropics to the forest tundra in order to identify the month whose average temperature would be statistically significant in biomass models. To achieve this goal, the WorldClim version 2.1 climate database for the years 1970-2000 was used (<https://worldclim.org/data/index.html>). It is established that the average summer temperature provides a weak geographically distributed climatic signal, which is not capable of being extracted from the general dispersion of factors determining the biomass of trees and stands. On the contrary, the average January temperature represents a sufficiently strong geographically distributed climatic signal due to the high ratio of the total variance (or temperature range) to the residual one, which provided the statistical significance of the previously identified influence of winter temperatures on the biomass of trees and stands of forest-forming genera of Eurasia [4]. The average annual temperature, characterized by a high correlation with the January temperature, may be statistically significant in explaining the variability of biomass of trees and stands of Eurasia. The identification of this premise will be a subject of our further research.

Keywords: forest biomass forecasting, climate signals, average temperature in January and July, average annual temperature.

Funding: the publication was prepared as part of the State Assignment of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

ВВЕДЕНИЕ

Понимание последствий изменения климата для роста деревьев необходимо для точного прогнозирования динамики лесов в будущих сценариях изменения климата [6]. В связи с изменением климата и попытками его стабилизации путем включения в углеродный цикл динамики биомассы управляемых лесов возрастает роль эмпирических моделей, достаточно адекватно описывающих изменчивость биологической продуктивности древостоев и позволяющих прогнозировать ее изменение под влиянием климатических сдвигов. В имеющихся публикациях, посвященных моделированию биомассы лесов с учетом влияния температур и осадков, вклад названных переменных в объяснение изменчивости биомассы, оказывается либо несущественным, либо нулевым [10]. Это происходит, главным образом, вследствие локального или регионального уровня моделей, ограниченных, например, территорией Западной Европы [7]. В подобных случаях диапазон климатических переменных слишком узок, чтобы быть статистически значимым на фоне варьирования структурных переменных деревьев и древостоев [3]. 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. Чтобы обеспечить максимальную стабильность прогностической модели, каждая из независимых климатических переменных должна быть представлена в максимальном диапазоне их изменчивости [2].

На фоне долгосрочных климатических сдвигов в течение десятилетий именно зимние, а не летние или среднегодовые температуры, более чувствительны к текущим изменениям климата [1; 5; 8; 11]. Было установлено, что именно зимние температуры обеспечивают наибольший вклад в объяснение изменчивости некоторых характеристик биоты, в частности, динамики ее фитомассы [9]. Наличие авторских баз данных о биомассе деревьев и древостоев лесообразующих родов Евразии [12; 13] дало возможность разработать модели биомассы, включающие в качестве независимых переменных таксационные их характеристики и территориально распределенные показатели температур и осадков. При этом, с учетом выше сказанного были использованы средние показатели январских температур, а осадки учтены как среднегодовые.

Тем самым был обеспечен максимальный диапазон варьирования температур и осадков вследствие обширности территории Евразии, где средняя температура января колеблется от -40°C в лесотундре Северо-Восточной Сибири до $+10^{\circ}\text{C}$ в субтропиках Китая, а данные об осадках варьируют в диапазоне от 190 мм в районах вечной мерзлоты на северо-востоке Сибири до 1140 мм на юге Китая. Леса Малайзии и Филиппин не были включены в упомянутый анализ, поскольку для них характерен иной, чем в бореальных лесах, видовой состав. Имеющиеся данные географических координат пробных площадей нанесены на карты средней январской температуры (https://store.mapsofworld.com/image/cache/data/map_2014/currents-and-temperature-jan-enlarge-900x700.jpg) и среднегодовых осадков (<http://www.mapmost.com/world-precipitation-map/free-world-precipitation-map/>) [14] и совмещены с таксационными и биопродукционными показателями деревьев и древостоев. В результате регрессионного анализа установлено, что в холодных регионах при повышении осадков биомасса снижает-

ся, но по мере перехода к теплым регионам она характеризуется противоположным трендом, т. е. закономерность меняет знак. При повышении температуры во влажных регионах фитомасса увеличивается, но по мере перехода в сухие условия начинает снижаться и на предельном значении климатического фактора меняет знак. На основе метода пространственно-временного замещения закономерности изменения биомассы деревьев и древостоев в пространственных градиентах температур и осадков были использованы для прогнозирования изменений биомассы в темпоральном (временном) аспекте. Было показано, насколько и в каком направлении изменится биомасса деревьев и древостоев при предполагаемом повышении температуры на 1 °С и при предполагаемом снижении годовых осадков на 20 мм [4].

В процессе апробации полученных закономерностей были высказаны альтернативные точки зрения в отношении корректности использования зимних температур для прогнозирования биомассы как в территориальных, так и в темпоральных ее градиентах. В частности, было высказано мнение, что использование температуры января не имеет биологического смысла. В представленных результатах [4] было установлено влияние зимних температур на биологическую продуктивность, но с биологической точки зрения оно якобы должно быть значительно меньше влияния температуры летних месяцев. Статистически более тесные связи с температурами января должны быть подкреплены биологическим смыслом полученных закономерностей.

ЦЕЛЬ, МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель настоящего исследования состояла в исследовании взаимосвязи температур разных месяцев на территории Евразии и их изменения в широтном градиенте от тропиков до лесотундр. Для выполнения поставленной цели использована база климатических данных WorldClim версии 2.1 за 1970–2000 годы (<https://worldclim.org/data/index.html>) [15]. На этот же календарный период приходится получение около 95 %

имеющихся фактических данных о биомассе деревьев и древостоев на пробных площадях в лесном покрове Евразии, приведенных в используемых базах данных [12; 13]. По координатам 15 тыс. пробных площадей, распределенных на территории от Малайзии и Филиппин до Великобритании и Крайнего Севера Сибири установлены средние температуры каждого месяца, а также среднегодовые температуры за 30-летний период. По полученным данным выполнен корреляционный анализ средних территориально распределенных температур разных месяцев и установлена их динамика в широтном градиенте.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно построенной корреляционной матрице, связь температуры января с температурами других месяцев снижается по мере увеличения календарного диапазона между месяцами, т. е. связь температуры января с температурой февраля, марта, апреля, мая, июня и июля характеризуется коэффициентами корреляции соответственно 1,0; 0,99; 0,94; 0,87; 0,73 и 0,70 (рис. 1). В то же время, связь температуры января со среднегодовой температурой характеризуется коэффициентом корреляции около 0,90 (рис. 2).

На рис. 3 показано изменение средних температур в точках заложения пробных площадей с определениями биомассы деревьев и древостоев в широтном градиенте от тропиков до лесотундр. Очевидно, что минимальный диапазон характерен для температуры июля, которая в диапазоне от северного предела древесной растительности до экваториальных областей увеличивается с 15 до 27 °С, и перепад между минимальной и максимальной температурой составляет 12 °С. Примерно такие же перепады температур были в исследованиях их влияния на биологическую продуктивность насаждений на региональных уровнях [7; 10], когда исследуемая зависимость характеризовалась низким отношением общей дисперсии (или перепада температур) к остаточной дисперсии. В результате влияние температуры на продуктивность насаждений оказывалось статистически не значимым.

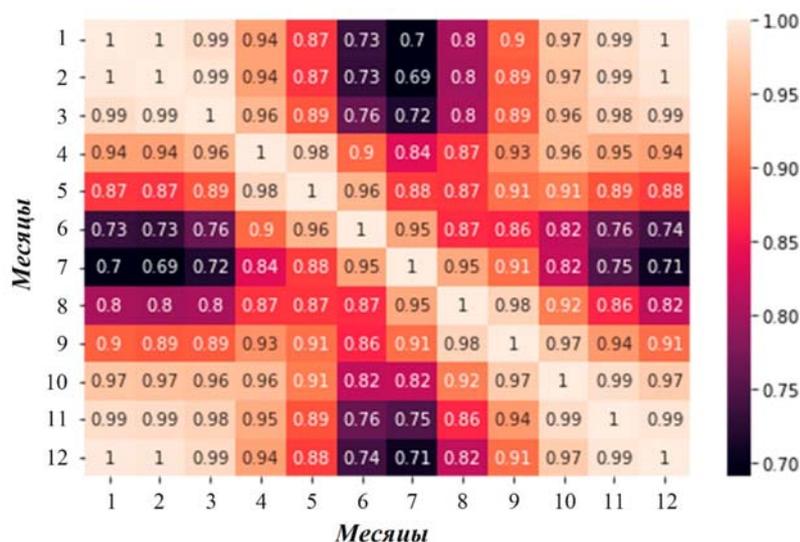


Рис. 1. Корреляционная матрица среднемесячных температур на территории Евразии

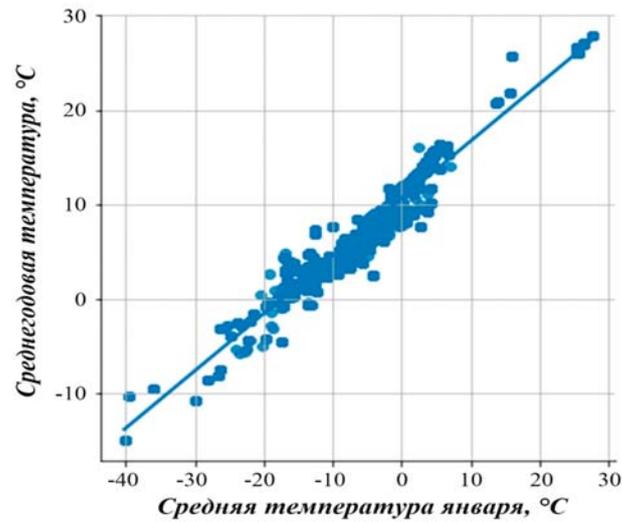


Рис. 2. Связь среднегодовой температуры с температурой января на территории Евразии

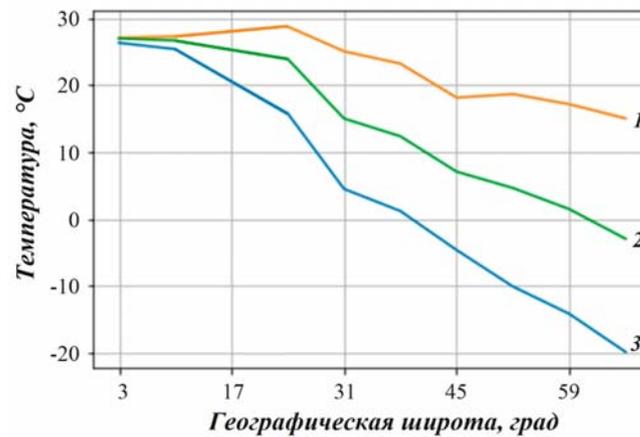


Рис. 3. Изменение средней температуры июля (1), среднегодовой температуры (2) и средней температуры января (3) в градиенте географической широты Евразии

Напротив, температура января в диапазоне от северного предела древесной растительности до экваториальных областей увеличивается с -20 до 27 °С, и перепад между минимальной и максимальной температурой составляет 47 °С (рис. 3). Именно высоким отношением общей дисперсии (или перепада температур) к остаточной объясняется статистическая значимость выявленного влияния зимних температур на биомассу деревьев и древостоев лесообразующих родов Евразии [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, «биологический смысл» выполненного анализа заключается в том, что средняя летняя температура обеспечивает слабый территориально распределенный климатический сигнал, настолько слабый, что он не вычлняется из общей дисперсии факторов, определяющих биомассу деревьев и древостоев, что и было показано на региональных уровнях [7; 10]. Напротив, средняя температура января представляет достаточно сильный территориально распределенный климатический сигнал благодаря высокому отношению общей дисперсии (или перепада температур) к остаточной, что обеспечило статистическую

значимость выявленного влияния зимних температур на биомассу деревьев и древостоев лесообразующих родов Евразии [4]. Среднегодовая температура, характеризующая высокой корреляцией с январской температурой (рис. 2) и промежуточным значением между перепадами средних июльских и средних январских температур (около 30 °С) (рис. 3), при объяснении изменчивости биомассы деревьев и древостоев Евразии может оказаться статистически значимой. Осуществление данной предпосылки составит предмет наших дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Голубятников Л. Л., Денисенко Е. А. Влияние климатических изменений на растительный покров европейской России // Известия РАН. Серия географическая. 2009. № 2. С. 57–68.
2. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: предельная продуктивность и география. Екатеринбург : УрО РАН, 2003. 406 с.
3. Усольцев В. А. О применении регрессионного анализа в лесоводственных задачах // Лесная таксация и лесостроительство. 2004. № 1 (33). С. 49–55.

4. Цепордей И. С. Биологическая продуктивность лесообразующих видов в климатическом контексте Евразии / под ред. В. А. Усольцева. Екатеринбург : Изд-во УМЦ УПИ, 2023. 467 с.
5. Bijak S. Tree-ring chronology of silver fir and its dependence on climate of the Kaszubskie Lakeland (Northern Poland) // *Geochronometria*. 2010. Vol. 35. P. 91–94.
6. Brecka A. F. J., Shahi C., Chen H. Y. H. Climate change impacts on boreal forest timber supply // *Forest Policy and Economics*. 2018. Vol. 92. P. 11–21.
7. Forrester D. I., Tachauer I. H. H., Annighoefer P. et al. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 396. P. 160–175.
8. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Intergovernmental Panel on climate Change, Geneva, Switzerland, 2007 (<https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>).
9. Morley J. W., Batt R. D., Pinsky M. L. Marine assemblages respond rapidly to winter climate variability // *Global Change Biology*. 2017. Vol. 23. P. 2590–2601.
10. Stegen J. C., Swenson N. G., Enquist B. J. et al. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients // *Global Ecology and Biogeography*. 2011. Vol. 20 (5). P. 744–754.
11. Toromani E., Bojaxhi F. Growth response of silver fir and Bosnian pine from Kosovo // *South-East European Forestry*. 2010. Vol. 1. P. 20–28.
12. Usoltsev V. A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests: digital version. The second edition, enlarged. Yekaterinburg : Ural State Forest Engineering University; Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020a (<https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9647>).
13. Usoltsev V. A. Forest biomass and primary production database for Eurasia: digital version. The third edition, enlarged. Monograph. Yekaterinburg : Ural State Forest Engineering University, 2020b (https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/9648/1/Base_v_2.xlsx)
14. World Weather Maps, 2007 (<https://www.mapsofworld.com/referrals/weather/>).
15. WorldClim версии 2.1 за 1970–2000 годы (<https://worldclim.org/data/index.html>).
2. Usoltsev V. A. Fitomassa lesov Severnoj Evrazii: predel'naya produktivnost' i geografiya. Yekaterinburg: UrO RAN, 2003. 406 p.
3. Usoltsev V. A. O primenении regressionnogo analiza v lesovodstvennykh zadachakh // *Lesnaya Taksatsiya i Lesoustrojstvo*. 2004. No. 1 (33). P. 49–55.
4. Tsepordey I. S. Biologicheskaya produktivnost' lesoobrazuyushchikh vidov v klimaticheskom kontekste Evrazii (pod red. V. A. Usoltseva). Ekaterinburg: Izd-vo UMTs UPI, 2023. 467 p.
5. Bijak S. Tree-ring chronology of silver fir and its dependence on climate of the Kaszubskie Lakeland (Northern Poland) // *Geochronometria*. 2010. Vol. 35. P. 91–94.
6. Brecka A. F. J., Shahi C., Chen H. Y. H. Climate change impacts on boreal forest timber supply // *Forest Policy and Economics*. 2018. Vol. 92. P. 11–21.
7. Forrester D. I., Tachauer I. H. H., Annighoefer P. et al. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 396. P. 160–175.
8. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Intergovernmental Panel on climate Change, Geneva, Switzerland, 2007 (<https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>).
9. Morley J. W., Batt R. D., Pinsky M. L. Marine assemblages respond rapidly to winter climate variability // *Global Change Biology*. 2017. Vol. 23. P. 2590–2601.
10. Stegen J. C., Swenson N. G., Enquist B. J. et al. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients // *Global Ecology and Biogeography*. 2011. Vol. 20 (5). P. 744–754.
11. Toromani E., Bojaxhi F. Growth response of silver fir and Bosnian pine from Kosovo // *South-East European Forestry*. 2010. Vol. 1. P. 20–28.
12. Usoltsev V. A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Eurasian forests: digital version. The second edition, enlarged. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University; Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020a (<https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9647>).
13. Usoltsev V. A. Forest biomass and primary production database for Eurasia: digital version. The third edition, enlarged. Monograph. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2020b (https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/9648/1/Base_v2.xlsx).
14. World Weather Maps, 2007 (<https://www.mapsofworld.com/referrals/weather/>).
15. WorldClim version 2.1 for 1970–2000 (<https://worldclim.org/data/index.html>).

REFERENCES

1. Golubyatnikov L. L., Denisenko E. A. Vliyanie klimaticheskikh izmenenij na rastitel'nyj pokrov evropejskoj Rossii // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2009. No. 2. P. 57–68.

© Цепордей И. С., Усольцев В. А.,
Норицин Д. В., 2023