

Анализ регрессионных связей температуры воздуха на разных высотах в горах Северного Урала

Н.В. Танцырев, Н.С. Иванова*, И.В. Петрова

Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*i.n.s@bk.ru

Аннотация. Статья посвящена актуальной современной проблеме: выявлению температурных факторов, лимитирующих распространение и выживание растений в горных условиях Северного Урала. Цель работы – установление регрессионных связей температурных данных в четырех высотных поясах южной части Северного Урала (59°30' с.ш., 59°15' в.д.) с контрольными температурными данными метеостанции г. Карпинск (Свердловская область 59°46' с.ш., 60°00' в.д.). Запись температур воздуха проводилась круглосуточно через каждые 2 ч на высоте 1,5–2 м от поверхности почвы с мая по октябрь 2019 г. в горнолесном поясе на высотах 460 и 640 м н.у.м. под пологом кедровых древостоев, в поясе подгольцовых редкостойных криволесий с элементами горной лесотундры на высоте 820 м н.у.м. и на плато в поясе горной тундры на высоте 1030 м н.у.м. Выявлено, что изменение температуры воздуха на разных высотных уровнях и на метеостанции происходит относительно синхронно, при этом разность среднесуточных температур с контрольными данными метеостанции на высотах 460, 640, 820 и 1030 м н.у.м. соответственно составляет 2,2, 3,0, 4,7 и 5,1 °С. Для всех высотных уровней установлена достоверная тесная прямолинейная связь среднесуточных температур воздуха с данными метеостанции. Для высот 460, 640, 820 и 1030 м н.у.м. коэффициент детерминации (R^2) составляет соответственно 0,96, 0,95, 0,92 и 0,88. Связи максимальных и минимальных температур в зависимости от высоты местности над уровнем моря с контрольными данными метеостанции также достаточно высоки (R^2 не опускается ниже 0,83 для максимальных и 0,7 для минимальных). С помощью выявленных связей и полученных уравнений регрессии открывается возможность ретроспективного восстановления динамики термического режима по данным метеостанции г. Карпинск для разновысотных горных местообитаний в южной части Северного Урала за многолетний период, в том числе крайних критических температур, которые выступают факторами, лимитирующими расселение и выживание растений, определяют биоразнообразие экосистем.

Ключевые слова: Северный Урал, горные экосистемы, высотные пояса, температура воздуха

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

Введение

Важность биосферной роли горных экосистем признается многими исследователями [1, 2]. Именно в горных районах находится более половины всех глобальных горячих точек, связанных с биологическим разнообразием, а от водоохранной функции горных экосистем зависит половина населения планеты [3]. Однако, одновременно с этим, горные экосистемы оказываются наиболее чувствительными к внешним воздействиям, в том числе к изменению климата [1, 3–5]. Поэтому со второй половины XX века в связи с прогрессирующим климатическими

сменами проблема динамики растительности в экстремальных горных условиях – одна из приоритетных в международной биогеографии [2, 6–8]. Многочисленные исследования подтверждают, что изменение климата может выйти за пределы адаптивной способности естественной растительности [9–12] и возникнет угроза катастрофических смен биоразнообразия, потеря устойчивости как локальных экосистем, так и биосферы в целом [4, 10, 13, 14]. Для горных территорий Урала, в силу водорегулирующих функций двух крупных водных бассейнов (Волжско-Камского и Обского), данная проблема стоит особенно остро.

Предположительно в связи с климатическими изменениями в последние 30–50 лет за счет интенсивного поселения лесообразующих древесных растений выше существующей верхней границы леса на Северном Урале наметилась тенденция ее повышения [15, 16]. Для ретроспекции климатических изменений и их влияния на рост и развитие древесных растений в экстремальных условиях верхней границы леса применяется главным образом дендрохронологический анализ в сочетании с температурными данными региональных метеостанций [17–19]. Несмотря на то что данный анализ хорошо себя зарекомендовал, с его помощью нельзя получить

всю необходимую для прогнозных моделей информацию, особенно в начальной стадии формирования дендроценозов. Имеющиеся данные метеостанций, в связи с их удаленностью, не всегда позволяют выявить региональные и ландшафтные особенности климатических условий для горных систем и не дают необходимую информацию для разработки прогнозных моделей динамики экосистем. Надежные долгосрочные разновысотные данные о горном климате, которые позволяют проверять региональные климатические модели, существуют лишь для очень немногих районов, например, таких как Европейские Альпы [3, 20]. Поэтому проблема выяв-

Таблица 1

Характеристика пробных площадей

Table 1

Characteristics of the sample plots

Номер ПП SP number	Высота, м н.у.м. Height (in m above sea level)	Горный пояс Mountain high-altitude belt	Тип фитоценоза Type of phytocenosis	Характеристика древостоя Stand characteristics			
				Видовой состав Species composition	h, м (m)	d, см (sm)	S, м ² (m ²)
ПП1 SP1	460	Низкогорный таежный Low-mountain taiga	Е-К тр.зм Dark coniferous grass-green mossy forest	3Е2К2С1П2Ос	24	28	39,5
ПП2 SP 2	640	Среднегорный таежный Mid-mountain taiga	К тр.зм. Forest dominated by Siberian pine grass-green moss	6К3Е1П+Б	18	32	22,4
ПП3 SP 3	820	Подгольцовый таежный Sub char taiga	К км. Sub char forest dominated by Siberian pine	7К2Е1Б	6,5	20	11,0
ПП4 SP 4	1030	Горнотундровый Mountain tundra	Кч.м.лш. Shrub-moss- lichen mountain tundra with Siberian pine young growth	—	—	—	—

Примечание. Тип фитоценоза: тип леса по Б.П. Колесникову [21]: Е-К тр.зм. – ельник-кедровник травяно-зеленомошный, К тр.зм. – кедровник травяно-зеленомошный, К км. – кедровник каменистый; тип горной тундры по П.Л. Горчаковскому [22]: Кч.м.лш. – горная тундра кустарничково-мохово-лишайниковая; h, м – средняя высота древостоя, м; d, см – средний диаметр стволов на высоте 1,3 м, см; S, м² – сумма площадей сечений стволов, м² на 1 га.

Note. Type of phytocenosis: forest type according to B.P. Kolesnikov [21], type of mountain tundra according to P.L. Gorchakovsky [22]; h, m – the average stand height (m); d, cm – the average trunks diameter at a height of 1.3 m (sm); S, m² – the sum of the cross-sectional areas of the trunks (m² per 1 ha).

ления факторов, лимитирующих выживание и распространение растений и животных в горных условиях, остается до сих пор не решенной.

Цель данной статьи – исследование регрессионных связей данных термодатологгеров, установленных в четырех высотных поясах Северного Урала, в том числе в условиях горной тундры выше современной верхней границы леса с температурными данными метеостанции г. Карпинск (Свердловская область). В перспективе – обоснование методики исследования динамики возобновления кедра (*Pinus sibirica* Du Tour) и сопутствующих видов выше существующей верхней границы леса, за последние 50 лет, в связи с погодичной динамикой температуры воздуха и верхнего горизонта почвы, реконструированной на основе этих связей.

Материал и методика

Исследования проведены в течение четырех лет с мая по октябрь в южной части основного водораздела Северного Урала (Новолялинское, Карпинское лесничества Свердловской области) на четырех высотных уровнях горы Третий Бугор (высота 1060 м над уровнем моря (н.у.м.)

59°30' с.ш., 59°15' в.д.): в горно-таежном поясе под пологом кедрового древостоя на высотах 460 м н.у.м. (П1) и 640 м н.у.м. (П2); в поясе подгольцовых редкостойных криволесий с элементами горной лесотундры на высоте 820 м н.у.м. (П3); на плато в поясе горной тундры на высоте 1030 м н.у.м. (П4). Характеристика пробных площадей приведена в табл. 1. Высота над уровнем моря (н.у.м.) определялась с помощью GPS-навигатора. Запись температур воздуха на высоте 1,5–2 м от поверхности почвы (с микроклиматической защитой от инсоляции) и почвы на глубине 5 см осуществлялась установленными на соответствующих высотных уровнях термодатологгерами, круглосуточно через каждые 2 ч. Метеостанция расположена на расстоянии 60 км от объектов исследования в г. Карпинск (59°46' с.ш., 60°00' в.д. на высоте 202 м н.у.м.). В работе приведены результаты исследований 2019 г.

На основе полученных временных рядов динамики температуры рассчитывались следующие показатели: среднесуточная температура, количество дней со среднесуточной температурой выше 5 и 10 °С, ниже 0 °С, сумма положитель-

Таблица 2

Основные температурные параметры на исследованных высотных поясах за период с 21 мая по 31 августа

Table 2

The main temperature parameters in the studied altitude zones for the period from 21 May to 31 August

Месторасположение / Location Высота, м н.у.м. / Height (in m above sea level)	К 202	П1 460	П2 640	П3 820	П4 1030
$N_{д} с t^{\circ} > 5^{\circ}C$	100	98	96	88	85
$N_{д} с t^{\circ} > 10^{\circ}C$	86	73	67	57	50
$N_{д} с t^{\circ} < 0^{\circ}C$	–	–	–	3	3
$\sum (+t^{\circ}C)$	1479,1	1249,2	1170,6	1004,2	962,1
t° средняя за летний период t° average for the summer period	14,8	12,5	11,8	10,1	9,8
$t^{\circ} \min$	–2,0	–2,5	–3,0	–5,0	–6,0
$t^{\circ} \max$	+31,4	+25,5	+24,5	+23,5	+23,0
Разность среднесуточных температур с К The difference in average daily temperatures with the weather station K	–	2,2±0,09	3,0±0,01	4,7±0,12	5,1±0,15

Примечание. К – контрольные данные метеостанции г. Карпинск; $N_{д}$ – количество дней со среднесуточной температурой; t° – температура, °С; $\sum(+t^{\circ}C)$ – сумма положительных среднесуточных температур.

Note. K – control data from the Karpinsk weather station; $N_{д}$ – the number of days with an average daily temperature; t° – temperature, degrees C; $\sum(+t^{\circ}C)$ – the sum of positive average daily temperatures.

ных среднесуточных температур, средняя температура за летний период наблюдения (с 21 мая по 31 августа), разность среднесуточных температур на пробных площадях с данными метеостанции в г. Карпинск. На основе регрессионного анализа проведено исследование связей темпе-

ратур воздуха на пробных площадях и метеостанции в г. Карпинск.

Результаты и обсуждение

В табл. 2 приведены обобщенные результаты наблюдений с 21 мая по 31 августа 2019 г. По

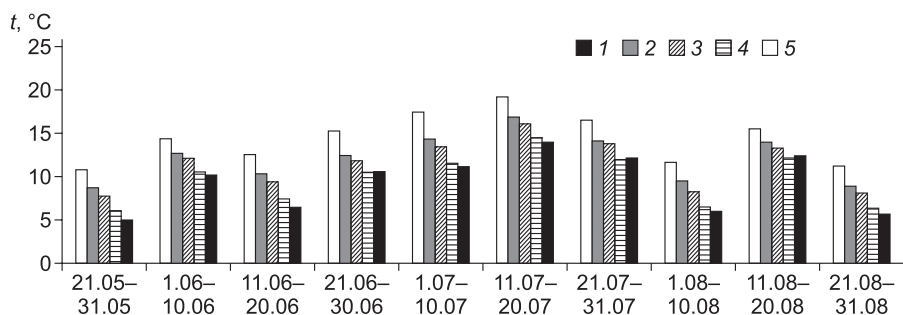


Рис. 1. Подекадная динамика средних температур воздуха: 1 – 460 м н.у.м.; 2 – 640 м н.у.м.; 3 – 820 м н.у.м.; 4 – 1030 м н.у.м.; 5 – контрольные данные метеостанции г. Карпинск.

Fig. 1. Sub-decadal dynamics of average air temperatures: 1 – 460 m above sea level; 2 – 640 m above sea level; 3 – 820 m above sea level; 4 – 1030 m above sea level; 5 – control data from the Karpinsk meteorological station.

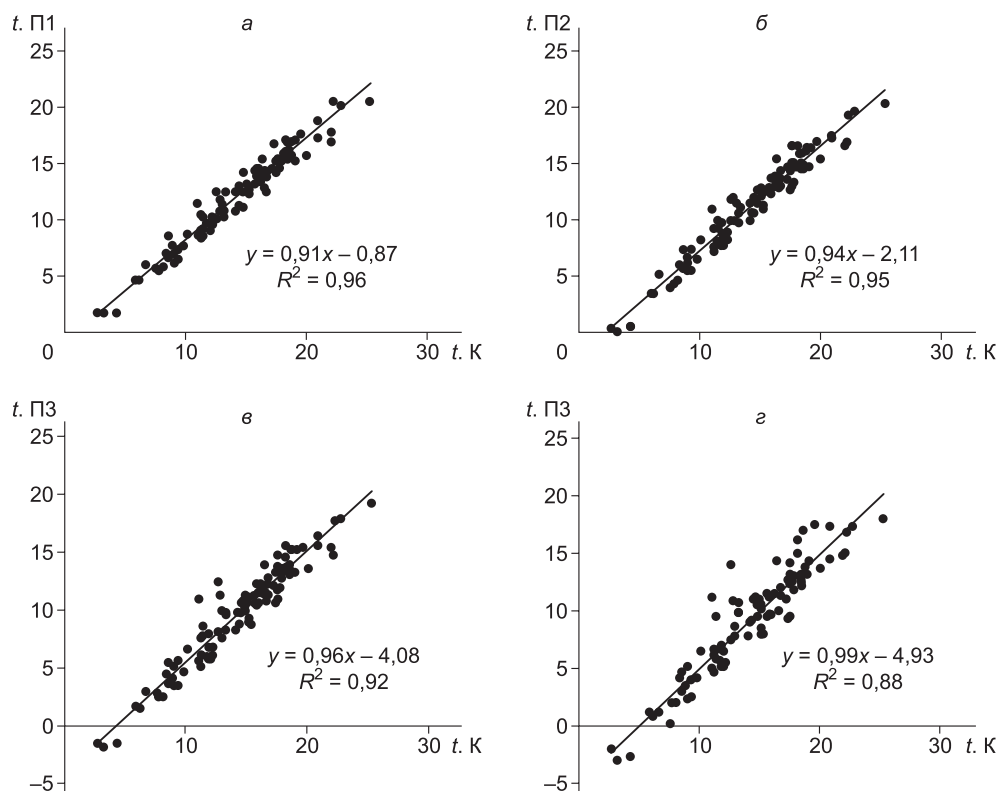


Рис. 2. Зависимость среднесуточной температуры воздуха (t) на высоте 460 м н.у.м. (a), на высоте 640 м н.у.м. ($б$), на высоте 820 м н.у.м. ($в$), на высоте 1030 м н.у.м. (горная тундра) ($з$) от среднесуточной температуры на метеостанции в г. Карпинск (K).

Fig. 2. Dependence of the average daily air temperature (t) at an altitude of 460 m above sea level (a), at an altitude of 640 m above sea level ($б$), at an altitude of 820 m above sea level ($в$), at an altitude of 1030 m above sea level (mountain tundra) ($з$) on the average daily temperature at the Karpinsk weather station (K).

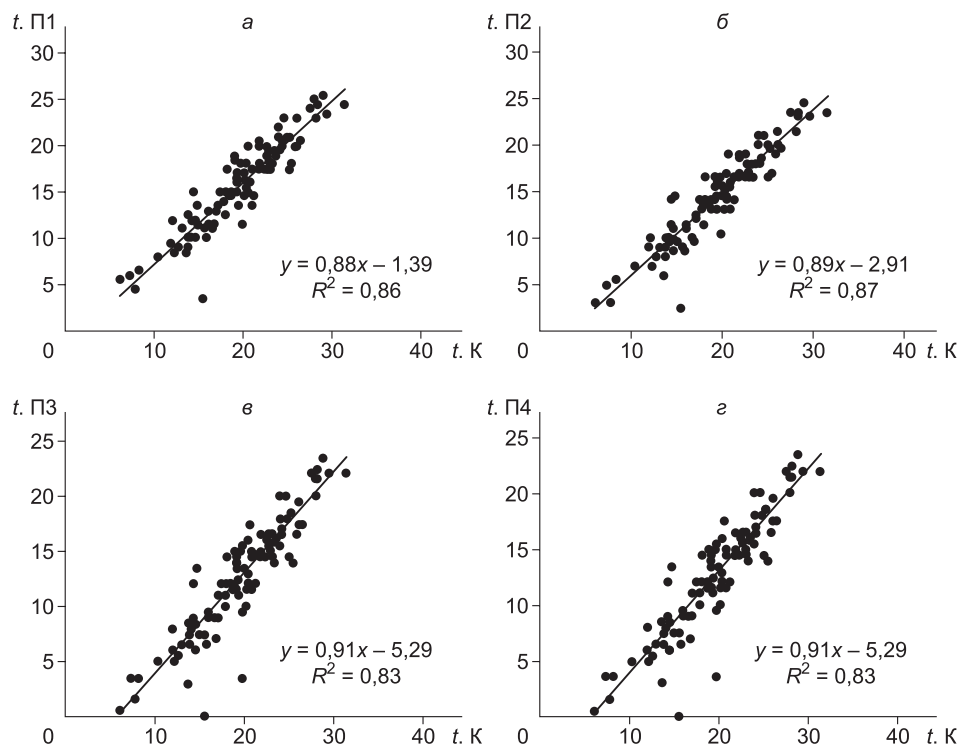


Рис. 3. Зависимость суточных максимумов температуры воздуха (t) на высоте 460 м н.у.м. (а), на высоте 640 м н.у.м. (б), на высоте 820 м н.у.м. (в), на высоте 1030 м н.у.м. (горная тундра) (г) от суточных максимумов температуры на метеостанции в г. Карпинск (К).

Fig. 3. The dependence of the daily maxima of air temperature (t) at an altitude of 460 m above sea level (а), at an altitude of 640 m above sea level (б), at an altitude of 820 m above sea level (в), at an altitude of 1030 m above sea level (mountain tundra) (г) on the daily maxima of temperature at the Karpinsk weather station (K).

мере повышения месторасположения проводимых измерений наблюдается снижение среднесуточных температур воздуха и соответственно увеличение разности с данными метеостанции.

Возможно, влияние на температурные данные на высоте 460 и 640 м н.у.м. оказывает инсолирующая поверхность древесного полога (сомкнутость крон около 70 %), в то время как в поясе редкостойных криволесий на высоте 820 м н.у.м. древесные растения единичны (сомкнутость крон не более 30 %), а в горной тундре (1030 м н.у.м.) они отсутствуют. Тем не менее, изменение температуры воздуха на разных высотных уровнях происходит относительно синхронно (рис. 1). Наиболее теплый период (продолжительностью около 40 дней) наблюдается с 21 июня по 31 июля. Кроме того, отмечено два коротких (не более 10 дней) теплых периода (в том числе и в поясе горной тундры на высоте 1030 м н.у.м.) в начале июня и в середине августа. При этом для всех высотных уровней установлена достоверная тесная прямолинейная связь среднесуточных

температур воздуха, записанных термодатологами, с данными метеостанции (рис. 2).

Полученные уравнения регрессии указывают на следующие факты. Во-первых, с увеличением высоты над уровнем моря коэффициенты a при значении x увеличиваются с 0,91 на высоте 460 м н.у.м. до 0,99 на высоте 1030 м н.у.м., но при этом они для всех изученных высотных поясов близки к единице. Это свидетельствует о том, что различия в температуре с данными метеостанции характеризует главным образом свободный член уравнения b . Во-вторых, коэффициент b в уравнении с увеличением высоты над уровнем моря увеличивается с 0,87 на 460 м н.у.м. до 4,93 на высоте 1030 м н.у.м., т. е. более чем в 5,5 раза. В-третьих, теснота выявленных зависимостей остается достаточно высокой для всех исследованных высотных поясов, несмотря на появление резких перепадов температуры с увеличением высоты местности, которые снижают тесноту установленных связей. Для высот 460, 640 и 820 м н.у.м коэффициент детерминации (R^2)

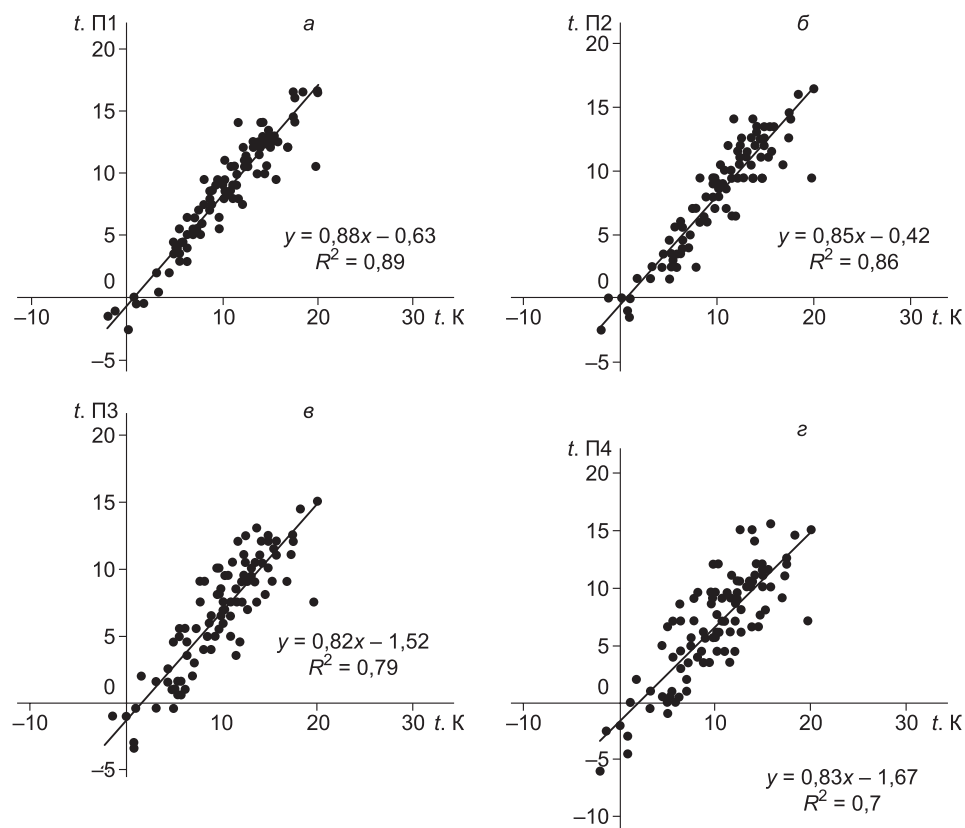


Рис. 4. Зависимость суточных минимумов температуры воздуха (t) на высоте 460 м н.у.м. (a), на высоте 640 м н.у.м. ($б$), на высоте 820 м н.у.м. ($в$), на высоте 1030 м н.у.м. (горная тундра) ($з$) от суточных минимумов температуры на метеостанции в г. Карпинск (K).

Fig. 4. Dependence of daily minima of air temperature (t) at an altitude of 460 m above sea level (a), at an altitude of 640 m above sea level ($б$), at an altitude of 820 m above sea level ($в$), at an altitude of 1030 m above sea level (mountain tundra) ($з$) on daily minima of temperature at the Karpinsk weather station (K).

составляет 0,96, 0,95 и 0,92 соответственно, для высоты 1030 м н.у.м. уже только 0,88.

Дополнительно нами исследованы связи максимальных и минимальных температур в зависимости от высоты местности над уровнем моря (рис. 3 и 4) с контрольными данными метеостанции. Исследуемые показатели являются важными для понимания расширения и сокращения ареалов видов растений их выживания и дифференциации растительности на высотные пояса.

Установлено, что для среднесуточных максимумов (см. рис. 3) сохраняется тенденция увеличения значений коэффициентов a при значении x с увеличением высоты над уровнем моря (с 0,88 на высоте 460 м н.у.м. до 0,91 на высоте 1030 м н.у.м.). Для среднесуточных минимумов (см. рис. 4) выявлена противоположная тенденция: снижения значений коэффициентов a при значении x с увеличением высоты над уровнем моря (с 0,88 на вы-

соте 460 м н.у.м. до 0,83 на высоте 1030 м н.у.м.). В целом теснота связи температур (как средних, так минимальных и максимальных значений) для всех исследованных высотных поясов с данными метеостанции остается высокой (R^2 не опускается ниже 0,88 для средних (см. рис. 2), 0,83 для максимальных (см. рис. 3) и 0,7 для минимальных (см. рис. 4) суточных температур).

Более подробный анализ заморозков показал, что за период измерений с 21 мая по 31 августа 2019 г. (103 дня) в подгольцовом поясе елово-кедровых редкостойных криволесий (ПЗ) на высоте 820 м н.у.м. и выше границы леса в поясе горной тундры (П4) на высоте 1030 м н.у.м. в 2019 г. наблюдалось 3 дня (21, 24, и 25 мая) со среднесуточными отрицательными температурами. На нижних высотных уровнях в эти дни среднесуточная температура воздуха оставалась положительной (0,5–1,7 °C), хотя в ночные часы она опускалась до –3,0 °C, Кроме того на высотах 820

и 1030 м н.у.м. выявлены два летних заморозка: 13 июня (до $-2,0^{\circ}\text{C}$) и 15 июня (до $-0,5^{\circ}\text{C}$).

Заключение

В результате целосезонных наблюдений установлены тесные прямолинейные связи температур воздуха на четырех горных высотных поясах Северного Урала (включая горно-тундровый пояс) с контрольными температурными данными метеостанции г. Карпинск. Получены уравнения регрессии. С помощью выявленных связей открывается возможность ретроспективного восстановления динамики термического режима по данным метеостанции г. Карпинск для разновысотных горных местообитаний в южной части Северного Урала за многолетний период, в том числе минимальных и максимальных значений температур, которые выступают факторами, лимитирующими распространение и выживание растений, определяют видовой состав и биоразнообразие экосистем. Таким образом, может быть в какой-то мере решена давно назревшая методологическая проблема количественного анализа влияния динамики климата на многие популяционно-биологические процессы, в частности на динамику верхней границы леса.

Литература

1. Pătru-Stupariu I., Hossu C.A., Grădinaru S.R., Nita A., Stupariu M.-S., Huzui-Stoiculescu A., Gavrilidis A.-A. A Review of Changes in Mountain Land Use and Ecosystem Services: From Theory to Practice // *Land*. 2020. Vol. 9(9). P. 336. <https://doi.org/10.3390/land9090336>
2. Gao J., Tang X., Lin S., Bian H. The influence of land use change on key ecosystem services and their relationships in a mountain region from past to future (1995–2050) // *Forests*. 2021. Vol. 12(5). P. 616. <https://doi.org/10.3390/f12050616>
3. Kohler T., Maselli D. Mountains and Climate Change – From Understanding to Action. Published by Geographica Bernensia with the support of the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC), and an international team of contributors. Bern, 2009. 78 p.
4. Иванова Н.С. Лесотипологические особенности биоразнообразия и восстановительно-возрастной динамики растительности горных лесов Южного и Среднего Урала: Дисс. ... докт. биол. наук / Уральский государственный лесотехнический университет. Екатеринбург, 2019. 304 с.
5. Jandl R., Kindermann G., Foldal C., Schüler S., Bouissou C. Early Performance of Tree Species in a Mountain Reforestation Experiment // *Forests*. 2021. Vol. 12(2). P. 256. <https://doi.org/10.3390/f12020256>
6. Mengist W., Soromessa T., Legese G. Ecosystem services research in mountainous regions: A systematic literature review on current knowledge and research gaps // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 702. P. 134581. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134581>
7. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A. Genetic forest typology as a scientific and methodological basis for environmental studies and forest management // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 609. 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012044>
8. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A., Zolotova E. Problem of climate-driven dynamics in the genetic forest typology // *Modern synthetic methodologies for creating drugs and functional materials (mosm2020): AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2388. 030007. <https://doi.org/10.1063/5.0068806>
9. Maiti R., Rodriguez H.G., Ivanova N.S. Autoecology and Ecophysiology of Woody Shrubs and Trees: Concepts and Applications. John Wiley & Sons, 2016. 352 p. <https://doi.org/10.1002/9781119104452>
10. Shirk A.J., Cushman S.A., Waring K.M., Wehenkel C.A., Leal-Sáenz A., Toney C., Lopez-Sanchez C.A. Southwestern white pine (*Pinus strobiformis*) species distribution models project a large range shift and contraction due to regional climatic changes // *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 411. P. 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.025>
11. Ivanova N.S., Zolotova E.S. Adaptation of forest ecosystems to the humidity factor in the Middle Urals // *Uchenye zapiski kazanskogo universiteta Seriya estestvennye nauki*. 2019. Vol. 161, No. 2. P. 293–306. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.2.293-306>
12. Ivanova N.S., Zolotova E.S., Li G. Influence of soil moisture regime on the species biomass of the herb layer of pine forests in the Ural Mountains // *Ecological Questions*. 2021. Vol. 32, No. 2. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2021.011>
13. Kellomäki S. Managing Boreal Forests in the Context of Climate Change: Impacts, Adaptation and Climate Change Mitigation. CRC Press, 2016. 365 p. <https://doi.org/10.1201/9781315166063>
14. Ivanova N., Fomin V., Kusbach A. Experience of forest ecological classification in assessment of vegetation dynamics // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 3384. <https://doi.org/10.3390/su14063384>
15. Шиятов С.Г., Мазена В.С. Современная экспансия лиственницы сибирской в горную тундру Полярного Урала // *Экология*. 2015. № 6. С. 403–410. <https://doi.org/10.1134/s1067413615060168>
16. Санников С.Н., Танцырев Н.В., Петрова И.В. Инвазия популяций сосны сибирской в горную тундру Северного Урала // *Сибирский экологический журнал*. 2018. № 4. С. 449–461. <https://doi.org/10.15372/SEJ20180406>
17. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986 г. 136 с.
18. Hagedorn F., Rigling A., Shiyatov S.G., Mazeppa V.S., Devi N.M., Grigor'ev A.A., Terent'ev M., Moiseev P.A., Bartysh A.A., Fomin V.V., Kapralov D.S., Bugman H. Treeline advances along the Urals Mountain range – driven by improved winter conditions? // *Global*

Change Biology. 2014. Vol. 20, No. 11. P. 3530–3543. <https://doi.org/10.1111/gcb.12613>

19. Hagedorn F., Dawes M.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Grigoriev A.A., Mazepa V.S., Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Nagimov Z.Y. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural Mountains despite a common thermal growth limit // Journal of Biogeography. 2020. Vol. 47, No. 8. P. 1827–1842. <https://doi.org/10.1111/jbi.13867>

20. Körner C. Alpine plant life. Functional plant ecology and high mountain ecosystems. Berlin: Springer Verlag, 1999. 238 p.

21. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Практическое руководство. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.

22. Горчаковский П.Л. Растительный мир высокогорного Урала. М.: Наука, 1975. 281 с.

Поступила в редакцию 18.01.2022

Поступила после рецензирования 14.03.2022

Принята к публикации 29.03.2022

Об авторах

ТАНЦЫРЕВ Николай Владимирович, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Ботанический сад, Уральское отделение Российской академии наук, 620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а, Россия,

<https://orcid.org/0000-0003-1904-4751>, Author ID: 23995967800, Researcher ID: AAW-6195-2021, e-mail: 89502076608@mail.ru

ИВАНОВА Наталья Сергеевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Ботанический сад, Уральское отделение Российской академии наук, 620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а, Россия,

<https://orcid.org/0000-0003-0845-9433>, Author ID: 56443439900, Researcher ID: O-8367-2019, e-mail: i.n.s@bk.ru

ПЕТРОВА Ирина Владимировна, доктор биологических наук, директор, Ботанический сад, Уральское отделение Российской академии наук, 620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а, Россия,

<https://orcid.org/0000-0001-5689-8452>, Author ID: 55935284300, Researcher ID: N-6695-2018, e-mail: irina.petrova@botgard.uran.ru

Для цитирования

Танцырев Н.В., Иванова Н.С., Петрова И.В. Анализ регрессионных связей температуры воздуха на разных высотах в горах Северного Урала // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 258–267. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-258-267>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-258-267

Analysis of regression relationships of air temperature at different altitudes in the mountains of the Northern Urals

N.V. Tantsyrev, N.S. Ivanova*, I.V. Petrova

Institute Botanic Garden UB RAS, Yekaterinburg, Russia

*i.n.s@bk.ru

Abstract. We investigate the temperature factors, which limit the spread and survival of plants in high mountain conditions of the Northern Urals. We aim to establish regression relationships of temperature data of four altitudinal belts in the southern part of the Northern Urals (59°30' N, 59°15' E) with the control data received from the Karpinsk meteorological station (Sverdlovsk region 59°46' N, 60°00' E). The air temperatures were recorded continuously day and night, every two hours, at a height of 1.5–2 m above the

soil surface from May to October 2019 at four elevation locations: 460 m a.s.l. (in the mountain forest belt, under the canopy of Siberian stone pine stands); 640 m a.s.l. (in the mountain forest belt, under the canopy of Siberian stone pine stands); 820 m a.s.l. (in the belt of sub-alpine woodlands with elements of mountain forest-tundra); 1030 m a.s.l. (on a plateau in the mountain tundra). We have established that the change in the air temperature at different elevation levels and at the meteorological station occurred relatively synchronously. The difference in average daily temperatures between the control data from the meteorological station and elevation points at 460, 640, 820 and 1030 m a.s.l. was 2.2, 3.0, 4.7 and 5.1 °C, respectively. We have established a reliable close rectilinear connection of the average daily air temperatures obtained from the station and all four elevation points. The coefficient of determination (R^2) for elevation levels at 460, 640, 820 and 1030 m a.s.l. was 0.96, 0.95, 0.92 and 0.88, respectively. The relationships between the maximum and minimum temperatures, depending on the elevation level, with the control data from the meteorological station were also quite high (R^2 does not fall below 0.83 for maximum and 0.7 for minimum). Identified relationships and obtained regression equations allow to reconstruct, retrospectively, the dynamics of the thermal regime based on the data from the Karpinsk meteorological station for mountainous habitats of different elevation levels in the southern part of the Northern Urals over a long-term period. The results also imply the possibility of reconstruction of extreme temperatures, which act as factors limiting dispersal and survival of plants, and determine the biodiversity of ecosystems.

Keywords: Northern Urals, mountain ecosystems, altitude zones, air temperature

Acknowledgements. The work was carried out within the state assignment of the Institute Botanic Garden Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

References

1. Pătru-Stupariu I., Hossu C.A., Grădinaru S.R., Nita A., Stupariu M.-S., Huzui-Stoiculescu A., Gavrilidis A.-A. A Review of Changes in Mountain Land Use and Ecosystem Services: From Theory to Practice // *Land*. 2020. Vol. 9(9). P. 336. <https://doi.org/10.3390/land9090336>
2. Gao J., Tang X., Lin S., Bian H. The influence of land use change on key ecosystem services and their relationships in a mountain region from past to future (1995–2050) // *Forests*. 2021. Vol. 12(5). P. 616. <https://doi.org/10.3390/f12050616>
3. Kohler T., Maselli D. Mountains and Climate Change – From Understanding to Action. Published by Geographica Bernensia with the support of the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC), and an international team of contributors. Bern, 2009. 78 p.
4. Ivanova N.S. Lesotipologicheskie osobennosti bio-raznoobrazie i vosstanovitel'no-vozrastnoy dinamiki rastitel'nosti gornych lesov Yuzhnogo i Srednego Urala. Diss. ... dokt. biol. nauk. [Forest typological features of biodiversity and restoration-age dynamics of vegetation of mountain forests of the Southern and Middle Urals. Dr. biol. sc. diss.] Yekaterinburg, 2019. 304 p.
5. Jandl R., Kindermann G., Foldal C., Schüller S., Bouissou C. Early Performance of Tree Species in a Mountain Reforestation Experiment // *Forests*. 2021. Vol. 12(2). P. 256. <https://doi.org/10.3390/f12020256>
6. Mengist W., Soromessa T., Legese G. Ecosystem services research in mountainous regions: A systematic literature review on current knowledge and research gaps // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 702. P. 134581. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134581>
7. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A. Genetic forest typology as a scientific and methodological basis for environmental studies and forest management // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 609. 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012044>
8. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A., Zolotova E. Problem of climate-driven dynamics in the genetic forest typology // *Modern synthetic methodologies for creating drugs and functional materials (mosm2020): AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2388. 030007. <https://doi.org/10.1063/5.0068806>
9. Maiti R., Rodriguez H.G., Ivanova N.S. Autoecology and Ecophysiology of Woody Shrubs and Trees: Concepts and Applications. John Wiley & Sons, 2016. 352 p. <https://doi.org/10.1002/9781119104452>
10. Shirk A.J., Cushman S.A., Waring K.M., Wehenkel C.A., Leal-Sáenz A., Toney C., Lopez-Sanchez C.A. Southwestern white pine (*Pinus strobiformis*) species distribution models project a large range shift and contraction due to regional climatic changes // *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 411. P. 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.025>
11. Ivanova N.S., Zolotova E.S. Adaptation of forest ecosystems to the humidity factor in the Middle Urals // *Uchenye zapiski kazanskogo universiteta Seriya estestvennye nauki*. 2019. Vol. 161, No. 2. P. 293–306. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.2.293-306>
12. Ivanova N.S., Zolotova E.S., Li G. Influence of soil moisture regime on the species biomass of the herb layer of pine forests in the Ural Mountains // *Ecological Questions*. 2021. Vol. 32, No. 2. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2021.011>
13. Kellomäki S. Managing Boreal Forests in the Context of Climate Change: Impacts, Adaptation and Climate Change Mitigation. CRC Press, 2016. 365 p. <https://doi.org/10.1201/9781315166063>

14. *Ivanova N., Fomin V., Kusbach A.* Experience of forest ecological classification in assessment of vegetation dynamics // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 3384. <https://doi.org/10.3390/su14063384>.
15. *Shiyatov S.G., Mazepa V.S.* Contemporary expansion of Siberian larch into the mountain tundra of the Polar Urals // *Russian Journal of Ecology*. 2015. Vol. 46, No. 6. P. 495–502. <https://doi.org/10.1134/S1067413615060168>.
16. *Sannikov S.N., Tantsyrev N.V., Petrova I.V.* Invasion of Siberian Pine Populations in Mountain Tundra in the Northern Urals // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11, No. 4. P. 396–405. <https://doi.org/10.1134/S1995425518040078>.
17. *Shiyatov S.G.* Dendrokronologiya verkhney grantsy lesa na Urale. Moskva: Nauka, 1986. 136 p.
18. *Hagedorn F., Rigling A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S., Devi N.M., Grigor'ev A.A., Terent'ev M., Moiseev P.A., Bartysh A.A., Fomin V.V., Kapralov D.S., Bugman H.* Treeline advances along the Urals Mountain range – driven by improved winter conditions? // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20, No. 11. P. 3530–3543. <https://doi.org/10.1111/gcb.12613>
19. *Hagedorn F., Dawes M.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Grigoriev A.A., Mazepa V.S., Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Nagimov Z.Y.* Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural Mountains despite a common thermal growth limit // *Journal of Biogeography*. 2020. Vol. 47, No. 8. P. 1827–1842. <https://doi.org/10.1111/jbi.13867>
20. *Körner C.* Alpine plant life. Functional plant ecology and high mountain ecosystems. Berlin: Springer Verlag, 1999. 238 p.
21. *Kolesnikov B.P., Zubareva R.S., Smolonogov Ye.P.* Lesorastitel'nyye usloviya i tipy lesov Sverdlovskoy oblasti. Prakticheskoye rukovodstvo. Sverdlovsk: UNTS AN SSSR, 1973. 176 p.
22. *Gorchakovskiy P.L.* Rastitel'nyy mir vysokogor-nogo Urala. M.: Nauka, 1975. 281 p.

Submitted 18.01.2022

Revised 14.03.2022

Accepted 29.03.2022

About the authors

TANTSZYREV, Nikolay Vladimirovich, Cand. Sci. (Biology), scientific researcher, Institute Botanic Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 202a, 8 Marta st., Yekaterinburg 620144, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1904-4751>, Author ID: 23995967800, Researcher ID: AAW-6195-2021, e-mail: 89502076608@mail.ru

IVANOVA, Natalya Sergeevna, Dr. Sci. (Biology), leading researcher, Institute Botanic Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 202a, 8 Marta st., Yekaterinburg 620144, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-0845-9433>, Author ID: 56443439900, Researcher ID: O-8367-2019, e-mail: i.n.s@bk.ru

PETROVA, Irina Vladimirovna, Dr. Sci. (Biology), director, Institute Botanic Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 202a, 8 Marta st., Yekaterinburg 620144, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-5689-8452>, Author ID: 55935284300, Researcher ID: N-6695-2018, e-mail: irina.petrova@botgard.uran.ru

For citation

Tantsyrev N.V., Ivanova N.S., Petrova I.V. Analysis of regression relationships of air temperature at different altitudes in the mountains of the Northern Urals // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 258–267. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-258-267>