

УДК 551.585.9

ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ
ХЕМЧИКСКО-КУРТУШИБИНСКОГО ЛЕСОРАСТИТЕЛЬНОГО ОКРУГА
РЕСПУБЛИКИ ТЫВА

Х. Б. КУУЛАР *, А. Ф. ЧУЛЬДУМ **

*Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов,
Сибирское отделение РАН, Кызыл, Россия*

В работе представлен анализ изменений климатических параметров (температуры воздуха, относительной влажности воздуха, испарения, суммы осадков и проекции скорости ветра) Хемчикско-Куртушибинского округа горных степей, горно-таежных травяных лиственных лесов Республики Тыва. Недостаточное количество метеостанций и отсутствие данных по высотным уровням мотивировали использование данных реанализа ERA-5. Оценка проводилась на основе данных за период 1961–2020 гг. в интервале высот от 500 до 2200 м над ур. м и более. Выявлены тенденции изменения основных климатических данных, рассчитаны скорости их изменений и проведена оценка аномалий. Результаты показывают значительные изменения климатических параметров, особенно на высотах 500–1000 м над ур. м., что может быть связано с глобальными изменениями климата.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.353>

Keywords: mountain region, forest-growing district, climate change trends.

Введение. Глобальная средняя температура воздуха с 1961 по 2024 гг. выросла примерно на 1,0–1,2°C относительно доиндустриального уровня (1850–1900 гг.) [1, 2]. Основной рост температуры наблюдается с 1970-х годов, причем последние десятилетия демонстрируют ускорение потепления.

Горные территории играют ключевую роль в формировании климата, являясь важным источником водных ресурсов и экосистемных услуг. В последние десятилетия они подвергаются значительным климатическим изменениям, что вызывает интерес научного сообщества. В горных районах Центральной Азии средняя температура увеличилась на 1,5–2°C за последние 30 лет. Это превышает глобальные темпы потепления, что связано с эффектом высотной амплификации (высотно-зависимое усиление потепления). В Тянь-Шане и Памире зимние температуры увеличились на 1,2–1,5°C за последние 30 лет. Это связано с уменьшением снежного покрова и изменением циркуляционных процессов в атмосфере [3].

* E-mail: khk1062022@gmail.com

** E-mail: tajkinol@gmail.com

В южной части Западной Сибири за последние 30 лет наблюдается устойчивое снижение относительной влажности воздуха [4]. В горных системах Южной Сибири влажность почвы играет ключевую роль как экологический фактор, определяющий структуру и динамику растительных сообществ. Ее показатели варьируются в зависимости от высотной поясности, экспозиции склонов, типа растительности и климатических условий [5, 6]. На фоне глобального потепления на территории региона фиксируется снижение относительной влажности, что, согласно данным метеостанций, оказывает негативное влияние на горные экосистемы. Это проявляется в учащении природных пожаров [5, 7], особенно весной, когда снижение влажности становится более выраженным из-за усиления испарения [6, 7]. Изменения атмосферной циркуляции, такие как ослабление западного переноса и увеличение частоты блокирующих антициклонов, усугубляют ситуацию. Это приводит к деградации высокогорных лугов и сокращению биоразнообразия, что ставит под угрозу устойчивость экосистем региона.

Изменения климата являются одной из наиболее актуальных проблем. Изучение климатических параметров на различных высотных уровнях позволяет лучше понять механизмы региональных и локальных изменений и их последствия.

Целью данной работы является оценка изменения климатических параметров Хемчикско-Куртушибинского округа горных степей, горно-таежных травяных лиственничных лесов по данным реанализа ERA-5 на разных высотных уровнях.

Новизна данного исследования заключается в том, что впервые для пяти высотных уровней получены ключевые климатические характеристики: относительная влажность, интенсивность испарения и преобладающие направления ветра.

Материалы и методы исследования. Хемчикско-Куртушибинский округ горных степей, горно-таежных травяных лиственничных лесов расположен на территории Республики Тыва в пределах 51° – 52° ш. и 92° – 94° в. д. Общая площадь округа составляет ~850 га. Особенности климата определяются условиями циркуляции атмосферы – воздействием азиатского максимума зимой и азиатской депрессии летом. По лесорастительному районированию относится к Центрально-Азиатской котловинно-горной лесорастительной области [8]. Большую часть округа занимает Уюкский хребет.

Уюкский хребет – горный хребет, южный отрог Западного Саяна. Характеризуется сложным рельефом с высотами, достигающими 2500 м над ур. м. Хребет отличается ярко выраженной высотной поясностью, что отражается в распределении растительности, включая типы лесов. Важный фактор, определяющий характер распространения растительности на хребте, – его рельеф. Он перераспределяет влагу, поэтому растительность верхней, средней или нижней частей макросклона находится в совершенно разных условиях увлажнения.

На северном макросклоне на высоте 500–8000 м над ур. м. расположены степные и лесостепные пояса. С высоты 900 м произрастает лиственница сибирская (*Larix sibirica*). Леса этого пояса разреженные с хорошо развитым

травяным покровом, в подлеске встречаются кустарники (рододендрон даурский, шиповник).

Подтаежный ВПК расположен на высоте 1000–1300 м над ур. м. Здесь произрастают лиственные породы (березы (*Betula pendula*, *Betula microphilla*), осины *Populus tremula*) и светлохвойные (лиственница сибирская).

С высоты 1300 до 2200 м над ур. м. произрастают здесь лиственница сибирская, ель сибирская (*Picea obovata*), кедр сибирский (*Pinus sibirica*). Леса густые, сомкнутые, с достаточным уровнем влажности. В подлеске распространены кустарники (багульник, черника), а также моховой покров.

На южном макросклоне только на высоте 1100–12000 м над ур. м появляются островки лесов по теневым склонам, с 1300 м леса начинают преобладать в растительном покрове. Климат здесь резко континентальный, с холодной и продолжительной зимой, коротким и прохладным летом. Средняя температура $-2,5 \pm 0,8^{\circ}\text{C}$, количество осадков $323,6 \pm 57,6 \text{ мм}$ (1988–2018 гг.) по данным близлежащей метеостанции “Туран” (абс. выс. 861 м).

Для оценки изменений климатических параметров использовались данные реанализа ERA-5 за периоды 1961–1990 и 1991–2020 гг. ERA-5 представляет собой пятое поколение реанализа атмосферы, разработанное Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Данные ERA-5 характеризуются высоким пространственным (горизонтальное разрешение $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$) и временным (часовое разрешение) разрешением, что позволяет проводить детальный анализ климатических изменений на региональном уровне [9].

Данные по температуре, относительной влажности, испарению, осадкам и скорости ветра были получены из открытого архива Copernicus Climate Data Store (CDS). Для анализа использовались среднемесячные значения климатических параметров, агрегированные по высотным уровням и временным периодам [10].

Тренды и скорость изменений – линейные тренды, определялись с использованием метода наименьших квадратов, скорость изменений рассчитывалась как наклон линейного тренда за исследуемый период.

Для обработки, визуализации и анализа данных использовались платформа Google Earth Engine и MS Excel. Приводился анализ климатических показателей на пяти высотных уровнях, м над ур. м.: 500–1000, 1001–1300, 1301–1700, 1701–2200, 2200 и более.

Оригинальность исследования заключается в адаптации методики высотного климатического зонирования для условий Хемчикско-Куртушинского лесорастительного округа. Впервые выявлены и количественно описаны закономерности пространственно-временной динамики климатических параметров на исследуемой территории округа.

Результаты исследований и их обсуждение. Среднегодовые климатические параметры исследуемого округа за периоды 1961–1990 и 1991–2020 гг., полученные на основе данных реанализа, представлены в таблице. Сравнение показателей позволяет выявить изменения ключевых метеорологических характеристик за последние 60 лет по пяти высотным уровням.

Видно, что с увеличением высоты над уровнем моря наблюдается снижение температуры воздуха. Интенсивность испарения уменьшается с

высотой. Количество осадков варьируется неравномерно, достигая максимума на высоте 2200 м и более. Скорость ветра (проекция U и V) остается низкой на всех высотах, но меридиональная составляющая скорости ветра (ветер по широте, то есть с юга на север или обратно), показывает устойчивое отрицательное значение, что может указывать на преобладание ветра в определенном направлении. Отрицательные значения относительной влажности могут быть ошибкой или специфическим форматом данных, требующим уточнения (см. таблицу).

Среднегодовые данные Хемчикско-Куртушибинского округа горных степей, горно-таежных травяных лиственных лесов по данным реанализа за 1961–2020 гг.

Высота, м над ур. м	1961–1990 гг.				
	Rh , %	T , °C	E_{var} , мм/ч	U , м/с	V , м/с
500–1000	63,3	–1,5	–30,0	0,16	–0,19
1000–1300	64,8	–2,5	–31,8	0,13	–0,29
1300–1700	65,8	–3,2	–32,0	0,16	–0,35
1700–2200	67,2	–4,1	–31,1	0,26	–0,25
2200 и более	66,5	–4,9	–29,68	0,44	0,14
	1991–2020 гг.				
	Rh , %	T , °C	E_{var} , мм/ч	U , м/с	V , м/с
500–1000	62,8	–0,5	–34,0	0,18	–0,23
1000–1300	64,4	–1,5	–34,7	0,14	–0,34
1300–1700	65,2	–2,3	–34,1	0,15	–0,39
1700–2200	66,5	–3,2	–32,7	0,25	–0,28
2200 и более	66,0	–4,2	–30,4	0,43	0,06

Примечание: Rh – относительная влажность; T – среднегодовая температура; E_{var} – испарение; U и V – проекции скорости ветра. Отрицательные значения испарения означают, что испарение измеряется как потеря влаги.

На высоте 1000–1300 м над ур. м. располагается нижняя граница леса. Изменения климатических параметров:

- рост температуры с $-2,5^{\circ}\text{C}$ до $-1,5^{\circ}\text{C}$, что соответствует скорости изменения $+0,033^{\circ}\text{C}/\text{год}$; относительная влажность снизилась с 64,8% до 64,4%, скорость изменения составила $-0,013\%/ \text{год}$;
- испарение увеличилось с $-31,8 \text{ мм}/\text{ч}$ до $-34,7 \text{ мм}/\text{ч}$, скорость изменения составила $-0,1 \text{ мм}/\text{ч}/\text{год}$;
- зональная составляющая скорости ветра U (ветер по долготе, то есть с запада на восток или обратно) увеличилась с $0,16 \text{ м}/\text{с}$ до $0,18 \text{ м}/\text{с}$, скорость изменения составила $+0,0007 \text{ м}/\text{с}/\text{год}$;
- меридиональная составляющая скорости ветра V (ветер по широте, то есть с юга на север или обратно) увеличилась с $-31,8 \text{ мм}/\text{ч}$ до $-34,7 \text{ мм}/\text{ч}$, скорость изменения $-0,10 \text{ м}/\text{с}/\text{год}$.

На высоте 2200 м над ур. м. и более расположена верхняя граница леса. Анализ данных на этом высотном уровне:

- рост температуры воздуха с $-4,9^{\circ}\text{C}$ до $-4,2^{\circ}\text{C}$, что соответствует скорости изменения $+0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$;
- относительная влажность снизилась с 66,5% до 66,0%, скорость изменения $-0,02\%/ \text{год}$;

- испарение увеличилось с $-29,7$ мм/ч до $-30,4$ мм/ч, скорость изменения $-0,02$ мм/ч/год;
- зональная проекция скорости ветра (U) увеличилась с $0,16$ м/с до $0,18$ м/с, скорость изменения $+0,0007$ м/с/год;
- меридиональная проекция скорости ветра V на тех же высотах увеличилась с $-31,8$ мм/ч до $-34,7$ мм/ч, скорость изменения $-0,1$ мм/ч/с/год.

Одним из негативных последствий потепления климата на территории республики является увеличение частоты природных пожаров, что приводит к сокращению лесных массивов. Это создает угрозу для экосистем и биоразнообразия региона. По данным Global Forest Watch, за 2001–2023 гг. 92% потерь лесного покрова в исследуемом округе были вызваны пожарами. Наибольшие потери зафиксированы в 2007 г., когда площадь утраченного лесного покрова достигла $13,3$ га. Общее сокращение лесного покрова с 2001 по 2023 гг. составило $46,2$ га из-за пожаров и $3,92$ га – по другим причинам [11].

По прогнозу через 30 лет на высоте 500–1000 м над ур. м. среднегодовая температура воздуха может повыситься до $\sim -0,5^{\circ}\text{C}$, относительная влажность снизится на $\sim 64,0\%$, испарение достичь $\sim -37,5$ мм/ч. На высоте 2200 м и более среднегодовая температура может повыситься до $\sim -3,4^{\circ}\text{C}$, относительная влажность снизится до $\sim 65,50\%$. Испарение может достичь $\sim -31,1$ мм/ч.

Заключение. За последние 30 лет территория Хемчикско-Куртушибинского округа горных степей, горно-таежных травяных лиственных лесов испытывает и значительные изменения. Анализ данных реанализа ERA-5 за 1961–2020 гг. показал значительные изменения климатических параметров на всех высотных уровнях, наиболее выраженные в температуре и испарении. Округ испытывает значительное потепление за последние десятилетия, особенно с 1980-х годов. На всех высотных уровнях округа наблюдается устойчивое повышение температуры, наиболее выраженное на высотах 1000–1700 м над ур. м. Снижение относительной влажности на всех уровнях особенно заметно на высотах 1300–2200 м над ур. м. Увеличено испарение на всех высотах, что связано с ростом температуры и снижением влажности. Прогнозируется к 2050 г. дальнейшее потепление на $0,5$ – $1,0^{\circ}\text{C}$, снижение относительной влажности на 1–2%. Таким образом, изменения связаны как с глобальными климатическими процессами, так и с локальными факторами. Необходимы дальнейшие исследования для разработки стратегий адаптации к изменяющимся условиям.

Исследование выполнено в рамках базового проекта ТувИКОПР СО РАН.

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензии 03.07.2025

Утверждена 15.08.2025

ЛИТЕРАТУРА

1. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Cambridge and New York, Cambridge University Press (2021).
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

2. *Global Temperature*. NASA Global Climate Change.
<https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>
3. Unger-Shayesteh K., Vorogushyn S., et al. What do we Know about Past Changes in the Water Cycle of Central Asian Headwaters? A Review. *Global and Planetary Change* **110** (2013), 4–25.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.02.004>
4. Кузнецова В.Н., Швець Н.В. Характеристика климатических изменений относительной влажности воздуха на азиатской территории России за период 1966–2021 гг. *Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных* **191** (2023), 56–67.
5. Куулар Х.Б.О., Чульдун А.Ф. и др. Пространственно-временное распределение весенней горимости растительного покрова Республики Тыва в 2000–2020 гг. *Природные ресурсы, среда и общество* **2** (2021), 18–22.
6. Парфенова Е.И., Чебакова Н.М. Влажность почвы высотно-поясных комплексов растительности в горах Южной Сибири. *Экологические проблемы использования горных лесов. Матер. III Междунар. науч.-практ. конф.* Краснодар (2024), 250–257.
7. Смагин В. Н. и др. *Типы лесов гор Южной Сибири*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние (1980), 336.
8. Куулар Х.Б. Горимость растительности на землях лесного фонда Республики Тыва в условиях изменяющегося климата. *Географическая среда и живые системы* **1** (2024), 70–85.
9. Hersbach H., Berrisford P., et al. The Era5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **146** (2020), 1999–2049.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>
10. ERA5: Fifth Generation of ECMWF Atmospheric Reanalyses of the Global Climate. *Copernicus Climate Change Service* (2017).
<https://cds.climate.copernicus.eu>
11. Global Forest Watch.
<https://www.globalforestwatch.org/>

Խ. Բ. ԿՈՒՐՄԱՆ, Ա. Ֆ. ՉՈՒԼԴՈՒՄ

ՏԻՎԱՅԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԽԵՄԶԻԿ-ԿՈՒՐՏՈՒՇԻԲԻՆՍԿԻ
ԱՆՏԱՌԱՅԻՆ ՇՐՋԱՆԻ ԿԼԻՄԱՅԱԿԱՆ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄ

Ամփոփում

Հոդվածում ներկայացված է Տյուվայի Հանրապետության խոտածածկության խեժափինու լայնատերև անտառների Խեմչիկ-Կուրտուշիբինսկի շրջանի լեռնային տափաստանների կլիմայական պարամետրերի (օդի ջերմաստիճան, օդի հարաբերական խոնավություն, գոլորշացում, տեղումների քանակ և քանու արագության պրոյեկցիա) փոփոխությունների վերլուծությունը: Օդերևութաբանական կայանների անբավարար թիվը և բարձրության մակարդակների տվյալների բացակայությունը հիմք հանդիսացան ERA-5 վերավերլուծության տվյալների օգտագործման համար: Գնահատումը հիմնված է 1961–2020 թվականների տվյալների վրա ծովի մակարդակից 500-ից 2200 մ և ավելի բարձրության սահմաններում: Բացահայտվել են հիմնական կլիմայական տվյալների փոփոխությունների միտումները, հաշվարկվել են դրանց փոփոխությունների տեմպերը և գնահատվել են անոմալիաները: Արդյունքները ցույց են տալիս կլիմայական պարամետրերի զգալի փոփոխություններ, հատկապես ծովի մակարդակից 500–1000 մ բարձրությունների վրա, որը կարող է կապված լինել գլոբալ կլիմայի փոփոխության հետ:

Kh. B. KUULAR, A. F. CHULDUM

CLIMATE ASSESSMENT OF KHEMCHIK–KURTUSHIBINSKY FOREST
DISTRICT THE REPUBLIC OF TYVA

Summary

The paper presents an analysis of changes in climatic parameters (air temperature, relative air humidity, evaporation, precipitation and wind speed projection) in the Khemchik–Kurtushibinsky district of mountain steppes, mountain-taiga grass larch forests of the Republic of Tyva. The insufficient number of meteorological stations and the lack of data on altitude levels motivated the use of ERA-5 reanalysis data. The assessment was carried out on the basis of data for the period 1961–2020 in the altitude range from 500 to 2200 *m* and more a.s.l. Trends in changes in the main climatic data were identified, the rates of their changes were calculated, and anomalies were assessed. The results show significant changes in climatic parameters, especially at altitudes of 500–1000 *m* a.s.l., which may be associated with global climate change.