

О. В. Марчукова¹, Д. А. Дирин², М. А. Борисенко³, М. В. Гудковских⁴

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ГОРНОМ АЛТАЕ В ПОСТСОВЕТСКИЙ ПЕРИОД

АННОТАЦИЯ

Республика Алтай является репрезентативным регионом для изучения климатических изменений в горах Северной Евразии. Алтай обладает полным набором высотных поясов и значительным ландшафтным разнообразием, на его территории находится крупный центр современного оледенения, он является важным водо- и климаторазделом, отделяющим бассейн Северного Ледовитого океана от бассейна внутреннего стока. К тому же на Алтае имеется довольно длительный ряд климатических наблюдений. Все это создает предпосылки к использованию территории Горного Алтай как модельного региона для выявления пространственных закономерностей изменения климата в горных странах. В настоящей работе исследованы тренды изменения температуры воздуха и количества выпавших осадков в Республике Алтай за три постсоветских климатических десятилетия: с 1992 по 2001, с 2002 по 2011 и с 2012 по 2021 гг. по данным метеостанций и двум атмосферным реанализам: NCEP/NCAR и ERA5. Для анализа использованы технологии ГИС в Matlab с применением Mapping Toolbox. Величина линейного тренда изменения среднемесячной температуры воздуха для трех периодов в Республике Алтай демонстрирует, что с 1991 по 2001 и с 2012 по 2021 гг. фиксируется потепление, средняя скорость которого в постсоветское десятилетие составляет 1,7 °C/10 лет, а в последнее десятилетие — 1,2 °C/10 лет. Однако с 2002 по 2011 гг. почти на всех метеостанциях Республики Алтай наблюдаются отрицательные значения коэффициентов линейных трендов, а средняя скорость похолодания в это десятилетие составила -0,9 °C/10 лет. Климатический анализ изменения количества выпавших осадков в Республике Алтай в среднем за последние два десятилетия показывает уменьшение тенденций. Средняя скорость сокращения осадков с 2002 по 2011 гг. составляет -2,2 мм/10 лет, а с 2012 по 2021 гг. — -11,0 мм/10 лет. Важно отметить, что сокращение жидких и твердых осадков характерно именно для западной части Республики Алтай.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: климат Горного Алтая, глобальное потепление, реанализы атмосферы, ГИС в климатологии

¹ Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail: o.v.marchukova@utmn.ru*

² Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail: d.a.dirin@utmn.ru*

³ Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail: m.a.borisenko@utmn.ru*

⁴ Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail: m.v.gudkovskikh@utmn.ru*

Olesia V. Marchukova¹, Denis A. Dirin², Maxim A. Borisenko³, Maria V. Gudkovskikh⁴

TRENDS OF CLIMATE CHANGE IN MOUNTAIN ALTAI DURING POST-SOVIET PERIOD

ABSTRACT

The Altai Republic is a representative region for studying climate change in the mountain areas of Northern Eurasia. Altai has a full set of high-altitude belts and significant landscape diversity, a large center of modern glaciation is located on its territory, it is an important water and climate divide separating the Arctic Ocean basin from the basin of internal runoff. In addition, there is a fairly long series of climatic observations in Altai. All this creates prerequisites for using the territory of the Altai Mountains as a model region to identify spatial patterns of climate change in mountainous countries. Monitoring and studying climate change in the Altai Mountains is an important and urgent task for Russia and the World, because in this region are located the largest glaciation areas. In the paper trends of air temperatures and precipitations in the Altai Republic are examined during three post-Soviet climatic decades: from 1992 to 2001, from 2002 to 2011 and from 2012 to 2021 used weather station data sets and two atmospheric reanalyses (NCEP/NCAR & ERA5). For the analysis, GIS technologies were used in Matlab using Mapping Toolbox. The magnitude of the linear trend in changes in average monthly air temperature for three periods in the Altai Republic demonstrates that from 1991 to 2001 and from 2012 to 2021 warming is recorded, the average rate of which in the post-Soviet decade is 1.7 °C/10 years, and in the last decade — 1.2 °C/10 years. However, from 2002 to 2011, almost all weather stations in the Altai Republic observed negative values of linear trend coefficients, and the average cooling rate in this decade was -0.9 °C/10 years. Climatic analysis of changes in the amount of precipitation in the Altai Republic on average over the past two decades shows a decreasing trend. The average rate of precipitation declines from 2002 to 2011 is -2.2 mm/10 years, and from 2012 to 2021 — -11.0 mm/10 years. It is important to note that the reduction in liquid and solid precipitation is typical specifically for the western part of the Altai Republic.

KEYWORDS: Altai climate, global warming, atmospheric reanalyses, GIS in climatology

ВВЕДЕНИЕ

Горный Алтай — один из центров криосферы и оледенения. Из-за глобального потепления количество ледников ежегодно сокращается [IPCC, 2021; IPCC, 2022; IPCC, 2023], что приводит к изменениям всей ландшафтной структуры, меняет водный режим и объем речного стока, отражаясь на жизнедеятельности населения не только самого горного региона, но и довольно удаленных от него территорий. По этой причине мониторинг и изучение изменения климата в этом регионе остается важной и актуальной стратегической задачей.

Климат Республики Алтай Российской Федерации обусловлен в первую очередь географическим положением самого региона и его сложным рельефом. Республика полностью находится в пределах горной системы Алтай, где высота горных хребтов достигает 4 км. Располагаясь на значительном удалении от океанов, Горный Алтай имеет

¹ Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia,
e-mail: o.v.marchukova@utmn.ru

² Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia, *e-mail:* d.a.dirin@utmn.ru

³ Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia, *e-mail:* m.a.borisenko@utmn.ru

⁴ Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia,
e-mail: m.v.gudkovskikh@utmn.ru

умеренно-континентальный климат с холодной зимой и теплым летом. В статье десятилетней давности 2012 г. [Ротанова и др., 2012] авторы утверждали, что годовая температура воздуха в Алтае за последние 170 лет выросла до 2,8 °С. Однако сохранилась ли эта тенденция в последнее десятилетие? Также важно понимать, за счет каких сезонов растет среднегодовая температура (т. к. от этого зависит протекание многих природных процессов), и как этот общий тренд дифференцирован в пространстве (в данном случае, в разных частях Республики Алтай и на разных высотных ярусах). Целью настоящей работы является изучение тенденций изменения температуры воздуха и количества выпавших осадков в Республике Алтай за три климатических десятилетия, приходящихся на постсоветский период: с 1992 по 2001, с 2002 по 2011 и с 2012 по 2021 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе привлекались разные данные основных гидрометеорологических параметров:

- среднемесячные значения температуры воздуха и осадков из реанализа NCEP/NCAR Национального центра прогнозирования окружающей среды США (NOAA) с разрешением 2,5° x 2,5° с 1950 по 2022 гг. [Kalnay et al., 1996];
- среднемесячные значения температуры воздуха из реанализа проекта Европейского союза «Copernicus» для наблюдения Земли ERA5 за период с 1940 по 2022 гг. с более высоким разрешением сетки в 0,25° [Hersbach et al., 2020];
- среднемесячные значения температуры воздуха и количества осадков с 1992 по 2022 гг. с 11 метеостанций Республики Алтай: Горно-Алтайск (51,97° с. ш., 85,83° в. д.), Кара-Тюрек (50,03° с. ш., 86,45° в. д.), Катанда (50,17° с. ш., 86,18° в. д.), Кош-Агач (50° с. ш., 88,67° в. д.), Кызыл-Озек (51,9° с. ш., 86° в. д.), Онгудай (50,75° с. ш., 86,13° в. д.), Турочак (52,25° с. ш., 87,13° в. д.), Усть-Кана (50,93° с. ш., 84,75° в. д.), Усть-Кокса (50,27° с. ш., 85,62° в. д.), Чемал (51,38° с. ш., 86,02° в. д.), Яйлю (51,77° с. ш., 87,6° в. д.). Расположение метеостанций продемонстрировано на рис. 1.

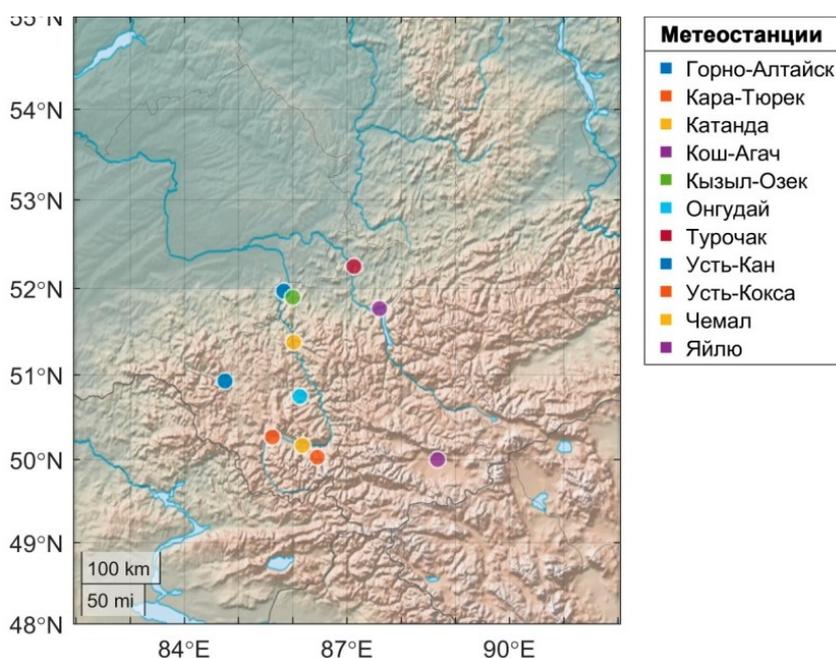


Рис. 1. Расположение метеостанций в Республике Алтай, Россия
Fig. 1. Location of weather stations in the Altai Republic, Russia

Основным методом исследования тенденций изменения температуры и количества выпавших осадков в Республике Алтай был выбран анализ линейных трендов. Коэффициенты линейных временных трендов вычислялись методом наименьших квадратов для периодов с 1992 по 2001, с 2002 по 2011 и с 2012 по 2021 гг. Размерность величины трендов (Tr) для температуры воздуха выражена в °C/10 лет, для осадков — мм/10 лет. Для картографического анализа пространственного изменения величин трендов были использованы технологии ГИС в Matlab с применением Mapping Toolbox.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчитанная величина линейного тренда изменения среднемесячной температуры воздуха для трех периодов на метеостанциях Республики Алтай показала, что с 1991 по 2001 и с 2012 по 2021 гг. наблюдалось потепление, средняя скорость которого в постсоветское десятилетие в исследуемом регионе составила 1,7 °C/10 лет, а в последнее десятилетие — 1,2 °C/10 лет. Однако с 2002 по 2011 гг. почти на всех метеостанциях Республики Алтай зафиксированы отрицательные значения коэффициентов линейных трендов, а средняя скорость похолодания в это десятилетия равна -0,9 °C/10 лет (табл. 1).

Табл. 1. Величины линейных трендов изменения температуры воздуха за 10 лет по данным метеостанций Республики Алтай
Table 1. The magnitude of linear trends in air temperature changes over 10 years according to weather stations in the Altai Republic

Метеостанция	Высота расположения (м)	Tr 1992–2001 (°C/10 лет)	Tr 2002–2011 (°C/10 лет)	Tr 2012–2021 (°C/10 лет)
Горно-Алтайск	291	1,8	-0,8	1,8
Кара-Тюрек	2596	1,4	0,3	1,1
Катанда	949	2,3	-2,1	1,2
Кош-Агач	1760	1,2	-1,0	0,9
Кызыл-Озек	326	1,6	-1,0	1,5
Онгудай	833	2,4	-1,5	0,9
Турочак	327	1,7	-0,9	1,3
Усть-Кан	1037	1,7	-1,0	1,2
Усть-Кокса	979	1,6	-0,4	1,3
Чемал	419	1,5	-1,0	1,1
Яйлю	480	1,3	-0,8	0,9

Если рассматривать пространственно-временную дифференциацию изменения величин трендов температуры воздуха в Республике Алтай, то по данным реанализа NCEP/NCAR на юго-востоке региона во второе десятилетие фиксируется незначительное потепление в районе метеостанции Кош-Агач, а с 2012 по 2021 — похолодание (рис. 2). Это не согласуется с реальными значениями (см. табл. 1), и отсюда можно сделать вывод, что в реанализе NCEP/NCAR плохо усвоены данные российских метеостанций Республики Алтай.

В отличие от NCEP/NCAR, реанализ ERA5 правильно воспроизводит величины линейных трендов изменения температуры воздуха для всех трех десятилетий в исследуемом регионе (рис. 3). Исходя из полученных результатов, можно предположить о влиянии квазипериодических межгодовых процессов, возникающих в климатической системе Земли, которые относятся к естественным природным процессам и могут вносить

большой вклад в изменчивость разных метеопараметров, нежели антропогенные процессы. Однако для доказательства этой гипотезы необходим более углубленный анализ изучения изменения климата в республике Алтай в зависимости от влияния основных индексов циркуляции атмосферы, таких как Южное Колебание, Арктическая Осцилляция, Северо-Атлантическое Колебание и др.

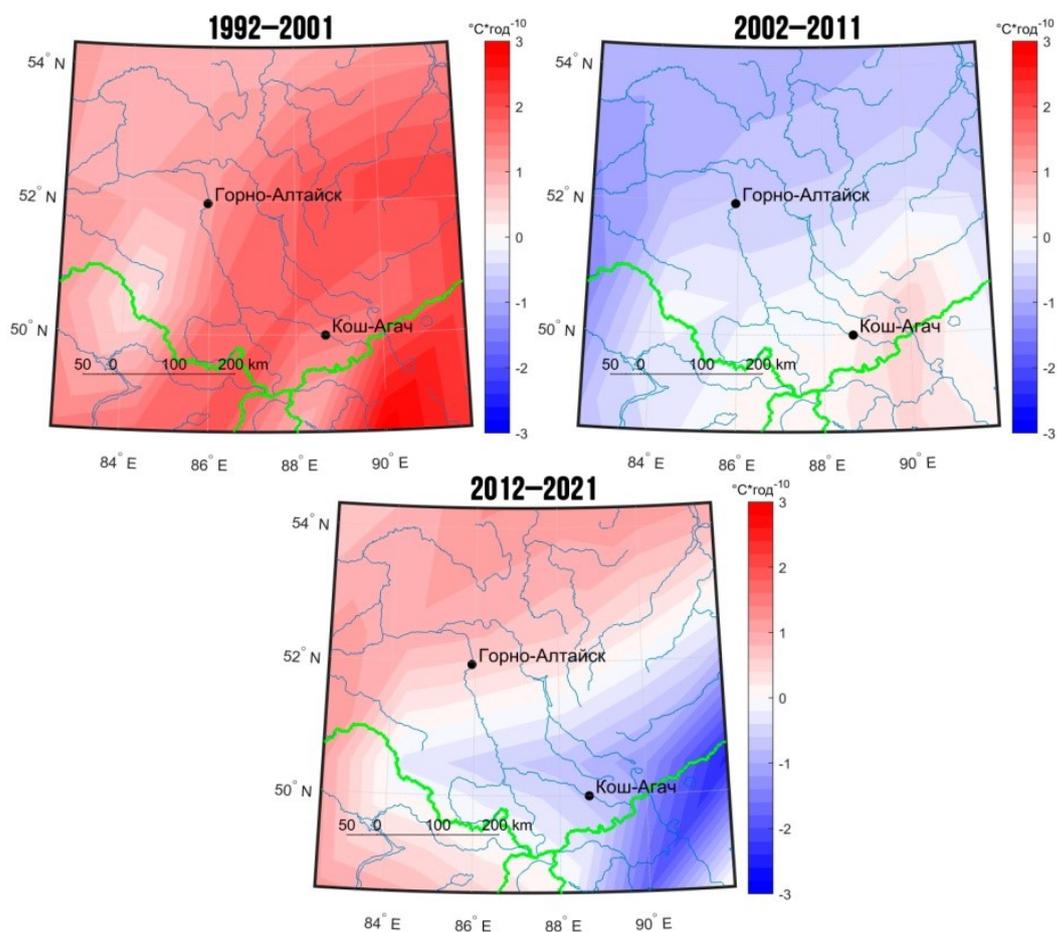


Рис. 2. Пространственное изменение величин линейных трендов температуры воздуха в Республике Алтай по данным реанализа NCEP/NCAR для трех десятилетних периодов
Fig. 2. Spatial changes in linear air temperature trends in the Altai Republic according to NCEP/NCAR reanalysis data for three ten-year periods

Климатический анализ изменения количества выпавших осадков в Республике Алтай для трех десятилетий вызвал трудности из-за огромных пропусков данных. В табл. 2 зеленым цветом выделены метеостанции, на которых зафиксированы полные ряды среднемесячных значений количества выпавших осадков. Это метеостанции Кара-Турек, Кызыл-Озёк, Турочак и Чемал. В среднем в регионе за последние два десятилетия наблюдается уменьшение количества осадков. Средняя скорость сокращения осадков с 2002 по 2011 гг. составила $-2,2$ мм/10 лет, а с 2012 по 2021 гг. — $-11,0$ мм/10 лет. Максимальная скорость уменьшения осадков ($Tr = -58,08$ мм/10 лет) в последнее десятилетие наблюдается на самой высокорасположенной метеостанции — Кара-Турек (высота составляет 2 596 м). Интересно отметить, что сокращение осадков характерно именно для западной части Республики Алтай (рис. 4).

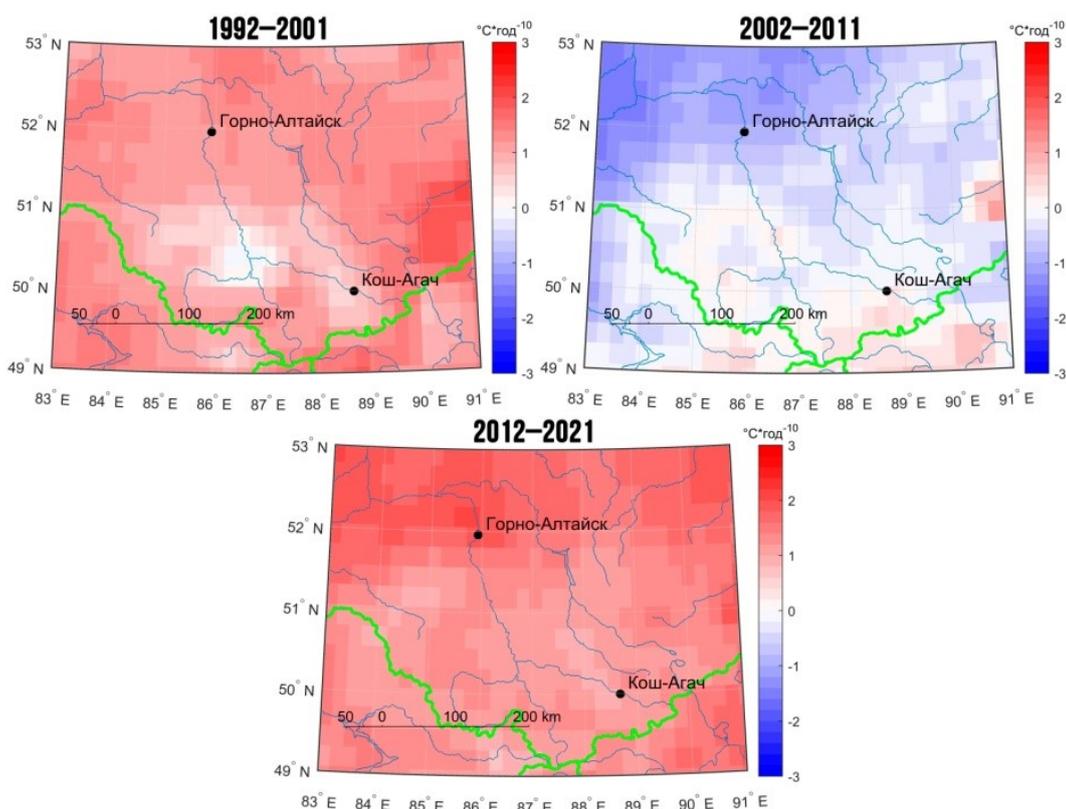


Рис. 3. Пространственное изменение величин линейных трендов температуры воздуха в Республике Алтай по данным реанализа ERA5 для трех десятилетних периодов
 Fig. 3. Spatial changes in linear air temperature trends in the Altai Republic according to ERA5 reanalysis data for three ten-year periods

Табл. 2. Величины линейных трендов изменения количества выпавших осадков за 10 лет по данным метеостанций Республики Алтай. Зеленым цветом отмечены полные ряды данных

Table 2. The magnitude of linear trends in changes in the amount of precipitation over 10 years according to weather stations in the Altai Republic. Complete data series are marked in green

Метеостанция	Высота расположения (м)	Tr 1992–2001 (мм/10 лет)	Tr 2002–2011 (мм/10 лет)	Tr 2012–2021 (мм/10 лет)
Горно-Алтайск	291	30,9	–33,528	–
Кара-Тюрек	2596	2,844	3,48	–58,08
Катанда	949	38,424	–3,072	4,944
Кош-Агач	1760	0,516	1,896	3,996
Кызыл-Озек	326	0,144	0,144	–38,22
Онгудай	833	3,144	2,184	–1,14
Турочак	327	13,872	–7,68	–3,132
Усть-Кан	1037	21,66	9,84	–4,476
Усть-Кокса	979	4,236	–1,236	–4,668
Чемал	419	11,556	–3,36	–1,428
Яйлю	480	–4,308	7,116	–8,064

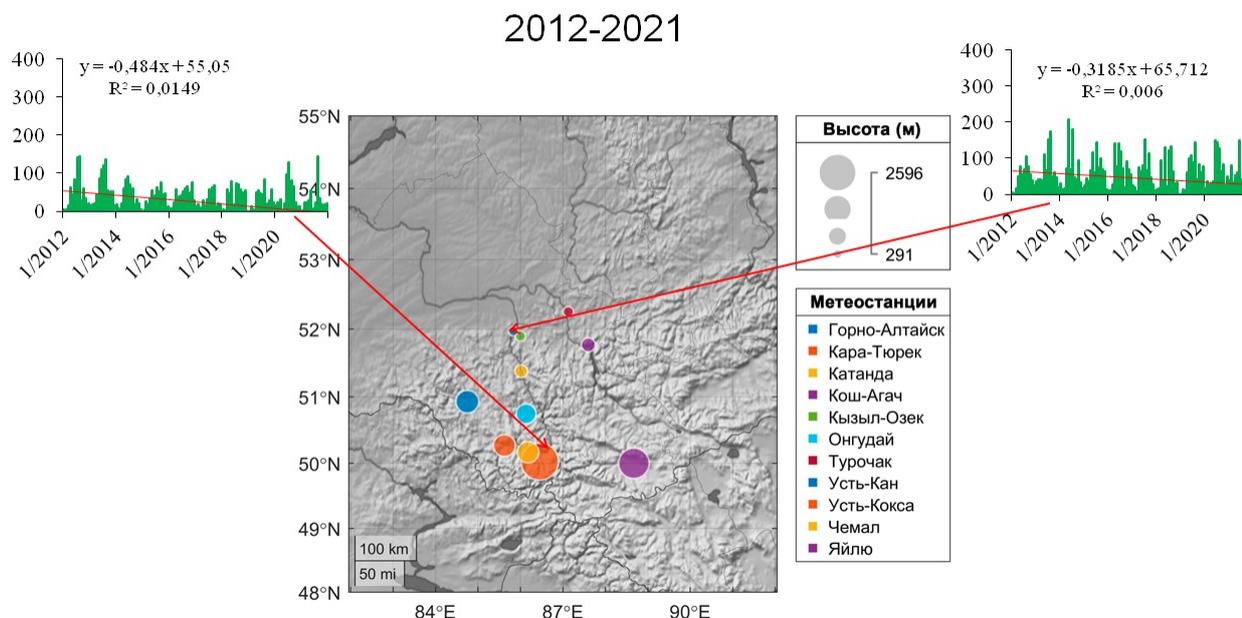


Рис. 4. Схема максимально сократившихся тенденций изменения количества осадков за период с 2012 по 2021 гг. на метеостанциях Кара-Тюрек и Кызыл-Озёке
Fig. 4. Scheme of the most reduced trends in precipitation changes for the period from 2012 to 2021 at the Kara-Tyurek and Kyzyl-Ozyok weather stations

ВЫВОДЫ

По данным метеостанций Республики Алтай Российской Федерации и двух атмосферных реанализов NCEP/NCAR и ERA5 проанализированы изменения двух основных климатических параметров — среднемесячной температуры воздуха и суммарного количества выпавших осадков за месяц — для трех десятилетних постсоветских периода с 1991 по 2021 гг. В целом за тридцать лет наблюдаются положительные тенденции изменения температуры воздуха, что согласуется с докладом Росгидромета за 2022 г. [Доклад об..., 2023]. Однако с 2002 по 2011 гг. линейные тренды изменения температуры воздуха почти на всех метеостанция Республики Алтай отрицательные. Возможно, это говорит о влиянии (наличии) квази-десятилетней осцилляции. Кроме этого, в настоящей статье сделан вывод, что заметно сократилось количество осадков за последнее десятилетие в некоторых высокогорных районах Алтая.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, грант № 23-27-00429.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-27-00429).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. Москва: Росгидромет, 2023. 104 с.

Ротанова И. Н., Харламова Н. Ф., Останин О. В. Изменения климата Алтая за период инструментальных исследований. Известия Алтайского государственного университета, 2012. № 3-2(75). С. 105–109.

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Roy J., Dennis J. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996. V. 77. Iss. 3. P. 437–470. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

REFERENCES

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Roy J., Dennis J. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996. V. 77. Iss. 3. P. 437–470. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

Report on climate features in the Russian Federation for 2022. Moscow: Rosgidromet, 2023. 104 p. (in Russian).

Rotanova I. N., Kharlamova N. F., Ostanin O. V. Climate changes in Altai during the period of instrumental research. *Izvestiya of Altai State University*, 2012. No. 3-2(75). P. 105–109 (in Russian).