

Научная статья

УДК 551.324+551.501.776

doi: 10.17223/25421379/36/9

ВЕКОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ЮГО-ВОСТОКЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ТОМСКА

Владимир Вениаминович Севастьянов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия,
vvs187@mail.ru



Аннотация. Рассмотрены региональные особенности изменения режима температуры приземного воздуха по данным опорной метеорологической станции Томск более чем за 180-летний период инструментальных наблюдений. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в исследуемый период произошли значимые повышения средних месячных и средних годовых температур, особенно в новом климатическом периоде (1990–2020 гг.). Приведена динамика средних месячных и средних годовых температур воздуха по климатическим периодам. Выявлена зависимость между изменениями температуры воздуха и общей циркуляцией атмосферы.

Ключевые слова: изменение климата, температура воздуха, циркуляция атмосферы, климатическая норма, Западная Сибирь

Для цитирования: Севастьянов В.В. Вековые изменения температуры воздуха на юго-востоке Западной Сибири на примере города Томска // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 153–169. doi: 10.17223/25421379/36/9

Original article

doi: 10.17223/25421379/36/9

AGE-OLD CHANGES IN AIR TEMPERATURE IN THE SOUTHEAST OF WESTERN SIBERIA ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF TOMSK

Vladimir V. Sevastyanov

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia, vvs187@mail.ru

Abstract. The article presents an overview of regional changes in the surface air temperature regime based on data of the reference meteorological station Tomsk. Meteorological observations at the Tomsk station have been conducted since 1837. The problem of occurring and expected regional and global changes in air temperature has become a topical issue for all people of the community. This may contribute to the emergence of climatic threats and the need for adaptation of mankind. An assessment of trends in the air temperature regime for 1837–2020 is given. The reasons for changes in climatic temperature norms can be very different. The real cause of global climate warming has not been established yet. The meteorological station Tomsk has been conducting observations for more than 180 years. 30 years is taken as a standard climatic period. Such a period allows for stable average climatic characteristics of weather and values of their variability. For the 30-year period it is possible to establish climate changes in time.

At Tomsk station in 1838–1875 there were omissions of air temperature observations. They were restored by the air temperature at Barnaul station. Mean monthly and mean annual air temperatures at Tomsk station were studied for six climatic periods: (1841–1870), (1871–1900), (1901–1930), (1931–1960), (1961–1990), (1991–2020). Mean annual temperatures for these periods were obtained at Tomsk station. It was noted that the highest rates of temperature increase are observed in the last 60 years. In the period from 1991 to 2020, the increase in the average rates of temperature increase is observed in the last 60 years. In the period from 1991 to 2020, an increase in average air temperatures was observed for five months. The average annual temperature increased by 1.0 °C. In some months, average temperatures increased up to 2.7 °C. During the summer months, changes in average air temperatures are minimal. For the period of time from the beginning of meteorological observations in Tomsk up to the present time average annual air temperatures have increased by 2.0 °C. In winter months and in transitional seasons — much more up to 4.7 °C.

Changes in average air temperatures in each climatic period by decades were considered. It was found out that opposite trends of air temperature change can also be observed in neighboring ten-year periods. It is shown that in the anomalously cold winter months, the weather with anticyclones and the eastern (E) form of the general circulation of the atmosphere prevails. In the anomalously warm winter months, cyclones prevail. The western (W) form and the meridional (C) form of circulation are often repeated. Changes in atmospheric circulation play an important role in climate change in Siberia. The main reason for the increase in air temperature in the south of Western Siberia is changes in the general circulation of the atmosphere.

Keywords: climate change, air temperature, atmospheric circulation, climatic norm, Western Siberia

For citation: Sevastyanov V.V. (2025) Age-old changes in air temperature in the southeast of Western Siberia on example of the city of Tomsk. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 153–169. doi: 10.17223/25421379/36/9

Введение

Региональные изменения климатических условий, обусловленные глобальным изменением климата, могут сопровождаться нарастанием изменчивости погодных условий. Это приводит к увеличению числа экстремальных (аномальных) погодных явлений. Отличительной особенностью современной климатической системы является тот факт, что при сравнительно небольших по величине изменениях средних значений часто наблюдается увеличение экстремальных погодных явлений.

В связи с большим разнообразием изменяющихся климатических условий на большой территории нашей страны существует необходимость разработки планов адаптации отраслей национальной экономики, в том числе планов на региональных уровнях субъектов Российской Федерации [Доклад..., 2020].

История изучения климата в Сибири началась с периода проведения Великой Северной экспедиции (1733–1743 гг.) под руководством В. Беринга. По пути следования экспедиции было организовано 12 метеорологических станций, одна из которых была основана в Томске в 1734 г. К сожалению, материалы наблюдений не сохранились, и пользоваться ими для характеристики климата Сибири в XVIII в. невозможно.

Следующий этап исследований климата в Томске начался с 1837 г. Метеорологические наблюдения того времени уже соответствовали определенным требованиям, которые были установлены метеорологической комиссией Русского императорского географического общества. Впоследствии данные наблюдений того периода были включены в климатические справочники. К сожалению, в Томске метеорологические наблюдения того времени по различным причинам неоднократно прерывались вплоть до 1875 г. Только с этого времени перерывов в наблюдениях не было.

Томск стал опорной точкой не только для описания климата Томской губернии, но и Сибири в целом, а также Российской империи [Вознесенский, Шостакович, 1913; Масленников, 1939; Русанов, 1958; Климат Томска, 1982; Задде и др., 2004]. Таким образом, метеорологическая станция Томск является одной из самых длиннорядных станций Западной Сибири. По данным наблюдений на ней судят о вековых долгопериодных изменениях климатических условий на рассматриваемой территории Западной Сибири.

С начала 1900-х гг. в Северной Европе стало более заметным потепление климата, а в 1920–1930-е гг. оно достигло своего максимума. Много работ посвящено этим исследованиям. Последствия потепления

были значительными и разнообразными. Уменьшилась ледовитость в Северном Ледовитом океане, отмечались отступления ледников [Чижов, Тареева, 1969], проникновение в высокие широты рыб из южных морей и многое другое. Уровень воды в реках и озерах, продолжительность вегетационного периода, вероятность засух также связаны с колебаниями климата. Потепление зим, распространившееся на огромные пространства, привлекло внимание многих ученых. Вопрос об изменчивости климата стал одним из важнейших в климатологии. Однако причины колебаний климата, вследствие их сложности и многообразия, а также совместных действий нескольких факторов в разных сочетаниях до сих пор слабо изучены.

Самый важный вопрос состоит в том, что является причиной возникновения и существования этих колебаний, а также какие обстоятельства могут влиять на их проявления, в частности, что является причиной сильного потепления, имевшего место в 1930-х гг. и в современный климатический период.

Существуют различные мнения о причинах рассмотренного колебания температуры воздуха. Одни ученые считают главной причиной колебания солнечной активности [Виллет, 1962; Вительс, 1962], другие – изменения прозрачности атмосферы за счет вулканической пыли [Будыко, 1971; Давитая, 1965], третьи – увеличение содержания углекислого газа в атмосфере [Plass, 1956; Гедеонов, 1973]. Исследования последних десятилетий показали, что содержание углекислого газа в атмосфере быстро увеличивается в результате производственной деятельности человека. По данным Ф.Ф. Давитая, за последние 50 лет произошло увеличение содержания CO_2 на 10–12 % в результате безвозвратного расходования кислорода на сжигание ископаемого горючего (угля, нефти, газа) нарушающего природное равновесие. Плас [Plass, 1956] полагает, что избыток CO_2 в атмосфере может заставить подняться температуру воздуха уже в текущем столетии, а так как количество сжигаемого топлива постоянно растет, то и температура будет иметь тенденцию к постоянному подъему. Эта тенденция к потеплению будет продолжаться по крайней мере в течение нескольких столетий.

Действительность не подтверждает теории решающего влияния CO_2 . Позднее потепление прекращалось, и наступало похолодание. Вряд ли влияние одного фактора антропогенного происхождения могло сыграть решающую роль в колебаниях глобального климата. Некоторые авторы указывают, что увеличение содержания CO_2 в атмосфере может быть скомпенсировано другими факторами. Например, Коллендер [Callender, 1938] высказал мнение, что океанские водоросли являются массовым потребителем угле-

кислого газа. Меллер [Möller, 1963] показал, что влияние увеличения содержания углекислого газа в атмосфере на 10 % может быть совершенно скомпенсировано изменением содержания водяного пара на 3 % или облачности на 1 %, т.е. изменением этих элементов на такие величины, которые лежат в пределах точности наблюдений.

О незначительности роли углекислого газа свидетельствует, по мнению Е.С. Рубинштейн и П.Г. Полозовой [1966], и разнонаправленность изменения температуры в разные годы и даже в соседние месяцы.

М.И. Будыко [1980] считает, что потепление наступает не столько за счёт избытка CO_2 в атмосфере, сколько в результате непосредственного обогрева её из-за увеличения производства энергии на Земле. Большое внимание М.И. Будыко уделял вопросу нарушения прозрачности атмосферы и его влияния на температуру Земли. Рядом авторов установлено, что после вулканических извержений, когда нижние слои атмосферы заполняются вулканическим пеплом, планетарная величина прямой солнечной радиации в течение нескольких месяцев или даже лет может быть понижена на 10–20 %. После крупных извержений это может привести к понижению температуры воздуха. В ряде исследований высказывалось предположение, что уменьшение прихода солнечной радиации могло произойти в результате загрязнения атмосферы промышленными примесями и пылью, попавшей в атмосферу при испытаниях ядерного оружия.

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о неоднозначном влиянии глобальных и региональных изменений климата на особенности общей циркуляции атмосферы в разных регионах России.

Территория Западной Сибири по характеристикам температуры воздуха существенно отличается от других климатических регионов России [Второй оценочный..., 2014; Харюткина и др., 2019; Третий оценочный..., 2022; Переведенцев, Васильев, 2023]. Поэтому требуется детальное изучение региональных изменений климата, благоприятных или неблагоприятных для тех или иных видов хозяйственной деятельности.

Цель работы заключается в изучении региональных особенностей изменения режима температуры воздуха на примере одной из самых длиннорядных станций в Сибири г. Томск. Важным этапом работы является оценка возможностей корректного восстановления непрерывного ряда средних месячных температур воздуха на станции Томск за период 1837–1875 гг. В начальном периоде регулярных метеорологических наблюдений в г. Томске имеются значительные пропуски в наблюдениях, что не позволяло охарактеризовать изменение температурного режима в Томске в середине XIX в.

Ближайшей к Томску длиннорядной станцией в Сибири является станция Барнаул. Наблюдения на ней начались с 1838 г. и не прерывались. Одной из задач данной работы была оценка возможности и целесообразности восстановить пропущенные ряды температуры в Томске. С учетом восстановленного ряда температуры стало возможным оценить динамику изменений температуры воздуха в Томске более чем за 180 лет инструментальных метеорологических наблюдений.

В работе в качестве стандартного периода для оценки климатических показателей, характеризующих текущий или современный климат, используется период 30 лет. Такая продолжительность климатических периодов была официально принята Всемирной метеорологической организацией (ВМО) со времени проведения Международных метеорологических конференций в Варшаве (1935 г.), Вашингтоне (1957 г.) [Международная..., 1937; Монин, 1982].

Позднее по решению Всемирного метеорологического конгресса (Женева, 2015 г.) уточнено определение климатической стандартной нормы, которая теперь должна относиться к последнему 30-летнему периоду, завершающемуся годом, оканчивающимся нулем (1981–2010, 1991–2020 гг. и т.д.). В Российской Федерации также приняты обновленные нормы основных климатических показателей, отражающих наблюдающееся изменение климата [Приказ Росгидромета..., 2022].

Стандартная продолжительность 30-летнего климатического периода получена из опыта и сравнительно хорошо удовлетворяет двум условиям: он достаточен для получения устойчивых средних климатических характеристик погод и величин их вариаций и в то же время не слишком велик, чтобы можно было своевременно установить происходящие изменения климата от одного периода к другому.

Понимание региональных процессов, происходящих в глобальной климатической системе, позволит оценить соответствующие изменения в природной среде и может повысить точность прогнозирования грядущих изменений климатических условий по крайней мере на ближайшее десятилетие с учётом инерционных свойств климатической системы.

Материалы и методы исследований

В качестве исходной информации были использованы массивы средних месячных данных о температуре воздуха за многолетний период на станциях Томск и Барнаул [AISORI-M.METEO.RU; Справочник, 1965; Научно-прикладной..., 1993].

Для оценки влияния общей циркуляции атмосферы на экстремальные показатели приземных средних месячных температур в Томске использовался календарный каталог элементарных синоптических

процессов, разработанный Г.Я. Вангенгеймом [Дмитриев и др., 2018].

На станции Томск были использованы данные о температуре воздуха за многолетний период с 1837 по 2020 г. В работе станции Томск в начальный период происходили длительные перерывы в наблюдениях. В результате количество пропусков наблюдений за период (1837–1874 гг.) составило около 50 % всех месяцев, что не позволяло объективно оценивать температурный режим в этот период времени.

Томская метеорологическая станция за время своего существования не раз меняла свое местоположение, в зависимости или от места работы заведующего станцией или от квартиры последнего. С начала наблюдений по 1843 г. станцией заведовал директор училищ Томской губернии Новотроицкий. С 1843 по 1846 г. был перерыв в работе станции. С 1846 по 1873 г. станция помещается при гимназии, заведует ею преподаватель Эльснер. За это время станция работала с пропусками. С 1873 по 1884 г. станция помещается при духовном училище (ныне переулочек Совпартшкольный) и находится в заведывании смотрителя Буткеева. С 1884 г. заведывание станцией переходит к директору реального училища Г.К. Тюменцеву, и станция переносится в здание реального училища, где остается до 1886 г., когда переносится на квартиру Г.К. Тюменцева по ул. Солдатской, ныне Красноармейской улице № 83. Здесь станция остается в продолжение 50 лет, до 1934 г. [Масленников, 1939]. В 1934 г. станция была перенесена на 3 км южнее на территорию лесопитомника, где находится в настоящее время. Перемещения метеорологической станции в г. Томске не существенно сказались на точности измерения температуры воздуха в прошлые годы. Территория города была небольшая, равнинная, перепад высот небольшой. Поэтому не возникало необходимости введения поправок на температуры в зависимости от смены местоположения.

Метеорологическая станция Томск находится на южной окраине города. Местность холмистая, изрезанная оврагами. Река Томь протекает к западу на расстоянии 1 км. Правый берег её, где расположена станция, образует крутой склон к реке высотой 40 м. Метеорологическая площадка располагается на высоте 139 м н.у.м.

На станции Барнаул метеорологические наблюдения были организованы с 1838 г., и с этого времени они продолжают без перерывов по настоящее время. Обе станции являются самыми длиннорядными в Западной Сибири. Метеорологическая станция Барнаул расположена в южной части Западно-Сибирской равнины. Местность слабо холмистая, степная. Река Обь протекает в 2 км к востоку в направлении с юго-запада на север.

Метеорологическая площадка находится на левом обрывистом берегу, высотой 50–70 м. К югу в 1,5 км в направлении с запада на восток протекает река Барнаул. Метеорологическая площадка располагается на высоте 157 м.

Относительная близость расстояния между станциями Томск и Барнаул, однотипность основных климатообразующих процессов на юго-востоке Западной Сибири позволили восстановить пропущенные значения температуры воздуха в Томске по данным наблюдений в Барнауле. Приведение средних месячных температур воздуха на станции Томск по данным станции Барнаул за периоды пропусков наблюдений проводилось методом регрессии.

Для климатических показателей температуры воздуха характерна устойчивость разностей температур этих станций. Исследования показали, что изменчивость разностей соответствующих температур двух станций можно считать линейной функцией расстояния между ними, по крайней мере для равнинных территорий. Приведение средних месячных температур воздуха целесообразно еще на расстоянии 300–400 км [Алисов и др., 1952; Рубинштейн, Полозова, 1968]. Расстояние между Томском и Барнаулом по прямой составляет около 350 км, что предполагает возможность и целесообразность восстановления рядов средних месячных температур на станции Томск. С целью выявления связи в ходе температур, устойчивости разностей между температурами обеих станций и, наконец, возможности приведения температур в соответствии с методикой [Алисов и др., 1952] были подсчитаны средние квадратические отклонения и коэффициенты корреляции соответствующих рядов температуры, а также определены критерии целесообразности приведения короткого ряда (пропущенных данных) наблюдений станции Томск к длинному ряду станции Барнаул.

Критерий целесообразности приведения определяется по формуле (1):

$$r(a, b) > \frac{0.5\sigma(a)}{\sigma(b)}, \quad (1)$$

где $r(a, b)$ – коэффициент корреляции между наблюдениями на станции a (Томск) и станции b (Барнаул); $\sigma(a)$ – среднее квадратическое отклонение ряда наблюдений на приводимой станции Томск; $\sigma(b)$ – среднее квадратическое отклонение ряда наблюдений на опорной станции Барнаул.

Для вычислений использовались данные параллельных наблюдений на обеих станциях за многолетний (1881–1980 гг.) период. В табл. 1 приведены коэффициенты линейной парной корреляции средних месячных температур воздуха, их средние квадратические отклонения на станциях Томск и Барнаул и результаты расчета критерия целесообразности приведения средних месячных температур воздуха для станции Томск.

Как показали вычисления, во все месяцы года наблюдается высокая, значимая корреляционная зависимость показателей средней месячной температуры воздуха на станциях Томск и Барнаул. Самые низкие коэффициенты корреляции отмечаются в августе (0,84), марте и июле (0,87), а в остальные месяцы он превышает 0,89. Значения коэффициентов корреляции во все месяцы года значительно превышают соотношение показателей мер изменчивости

температур воздуха на станциях. Поэтому приведение средних месячных температур воздуха на станции Томск по данным станции Барнаул считается целесообразным во все месяцы года, так как соответствует критериям, приведённым выше в формуле (1).

Приведение значений средних месячных температур воздуха на станции Томск проводилось по уравнениям регрессии (табл. 2).

Таблица 1

Критерии целесообразности приведения средних месячных температур воздуха на станции Томск по данным станции Барнаул

Table 1

Criteria for the expediency of bringing the average monthly air temperatures at the Tomsk station according to the Barnaul station

Показатель	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$r(a, b)$	0,91	0,91	0,87	0,92	0,92	0,89	0,87	0,84	0,91	0,91	0,90	0,93
$\sigma(a)$ Томск	4,2	3,7	3,1	2,6	2,1	1,7	1,6	1,3	1,5	2,3	3,9	4,9
$\sigma(b)$ Барнаул	4,0	3,8	3,2	2,7	2,0	1,6	1,6	1,4	1,5	2,1	3,7	4,1
$0,5 \sigma(a)/\sigma(b)$	0,53	0,49	0,49	0,48	0,53	0,53	0,50	0,47	0,50	0,55	0,53	0,54

Таблица 2

Уравнения регрессии для приведения средних месячных температур воздуха на станции Томск (y) по станции Барнаул (x)

Table 2

Regression equations for bringing the average monthly air temperatures at Tomsk station (y) to Barnaul station (x)

Месяц	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции и его погрешность	t -критерий Стьюдента	
			$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,05$
Январь	$y = 0,954x - 2,1$	$0,912 \pm 0,018$	20,26	0,211
Февраль	$y = 0,8416x - 2,9$	$0,914 \pm 0,018$	20,52	0,211
Март	$y = 0,8411x - 2,1$	$0,872 \pm 0,026$	16,23	0,211
Апрель	$y = 0,8455x - 1,6$	$0,916 \pm 0,018$	20,80	0,211
Май	$y = 1,017x - 2,7$	$0,924 \pm 0,016$	22,01	0,211
Июнь	$y = 0,9474x - 1,2$	$0,891 \pm 0,022$	17,88	0,211
Июль	$y = 0,9378x - 0,2$	$0,865 \pm 0,027$	15,71	0,211
Август	$y = 0,8721x + 0,5$	$0,839 \pm 0,032$	14,05	0,211
Сентябрь	$y = 0,9577x - 1,0$	$0,909 \pm 0,019$	19,87	0,211
Октябрь	$y = 0,9694x - 1,5$	$0,909 \pm 0,019$	19,87	0,211
Ноябрь	$y = 0,9331x - 2,7$	$0,903 \pm 0,020$	19,15	0,211
Декабрь	$y = 0,9936x - 2,4$	$0,928 \pm 0,015$	22,69	0,211

При определении параметров уравнений регрессии и коэффициентов корреляции следует оценить статистическую значимость коэффициентов корреляции по формуле (2). Статистическая значимость определяется абсолютной величиной коэффициента корреляции и зависит от объема выборки (n). При этом проверяют гипотезу о равенстве нулю оцениваемого коэффициента корреляции с помощью t -критерия Стьюдента.

$$t = \frac{r(a,b) \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r(a,b)^2}} \quad (2)$$

Рассчитанный показатель $t_{\text{расч}}$ сравнивают с табличным значением $t_{\alpha, \nu}$ при заданном уровне значимости α и числе степеней свободы $\nu = n - 2$. Уровень значимости α обычно принимается равным 5 % ($\alpha = 0,05$). Если вычисленный критерий $t_{\text{расч}}$ по абсолютной величине больше или равен табличному, то при заданном α проверяемую гипотезу отклоняют и

принимают, что вычисленный коэффициент корреляции статистически значим [Львовский, 1988]. Таким образом, приведение пропущенных средних месячных температур на станции Томск по данным станции Барнаул оказалось возможным и целесообразным. В результате приведения продолжительность ряда средних месячных и годовых температур воздуха на станции Томск увеличилась и достигла более 180 лет.

Результаты и обсуждение

Приземная температура воздуха является одной из самых главных характеристик климата любой территории. Можно дать много определений климата, но все они сводятся к тому, что это некоторая интегральная характеристика погод данной территории, полученная примерно за 30-летний период наблюдений.

Многолетние средние месячные и годовые температуры в Томске рассчитаны для шести 30-летних периодов (табл. 3).

При рассмотрении режима температуры воздуха нельзя обойтись только какой-либо одной характеристикой, этого будет недостаточно для освещения ее режима. Поэтому будут использованы следующие три характеристики температуры (табл. 4):

1) средняя месячная и средняя годовая температуры, физический смысл которых очевиден;

2) самая низкая температура за каждый месяц текущего климатического периода, характеризующая экстремально холодные погоды этого месяца;

3) самая высокая температура за каждый месяц текущего климатического периода, характеризующая экстремально теплые погоды этого месяца.

Использование этих показателей существенно расширяет описание температурных условий Томска за 180-летний интервал времени.

Таблица 3

Климатические 30-летние периоды. Станция Томск

Table 3

Climatic 30-year periods. Tomsk Station

Показатель	Годы					
	1841–1870	1871–1900	1901–1930	1931–1960	1961–1990	1991–2020
Номер климатического периода	1	2	3	4	5	6

Таблица 4

Многолетние средние месячные и годовые температуры воздуха (°C) на станции Томск (климатические нормы), а также их наименьшие и наибольшие значения

Table 4

Long-term average monthly and annual air temperatures (°C) at Tomsk station (climatic norms), as well as their lowest and highest values

Месяц	Значение	Годы, номер климатического периода						[Справочник, 1965] (1881–1960)	[Научно-прикладной..., 1993] (1881–1980)
		1841–1870	1871–1900	1901–1930	1931–1960	1961–1990	1991–2020		
		1	2	3	4	5	6		
Январь	Среднее	–20,2	–20,3	–18,5	–19,2	–17,8	–17,5	–19,2	–19,1 ± 0,4
	Наименьшее	–28,2	–29,3	–24,5	–27,1	–29,5	–29,4		
	Наибольшее	–13,6	–12,8	–10,8	–12,5	–10,2	–8,0		
Февраль	Среднее	–16,8	–17,4	–16,3	–16,6	–16,9	–14,2	–16,7	–16,9 ± 0,4
	Наименьшее	–22,2	–23,6	–23,0	–25,6	–28,2	–23,3		
	Наибольшее	–10,2	–10,7	–7,9	–10,4	–10,9	–7,7		
Март	Среднее	–11,0	–9,4	–10,6	–10,2	–8,1	–6,3	10,1	–9,9 ± 0,3
	Наименьшее	–18,0	–18,0	–16,6	–15,5	–12,9	–14,7		
	Наибольшее	–5,7	–2,1	–4,1	–4,5	–2,3	–1,3		
Апрель	Среднее	–0,6	–1,2	–0,3	0,6	0,7	2,6	–0,1	0,0 ± 0,3
	Наименьшее	–5,9	–5,9	–5,1	–5,3	–5,1	–3,1		
	Наибольшее	4,1	6,3	3,3	4,5	4,5	8,5		
Май	Среднее	8,1	8,0	8,8	8,9	9,0	10,4	8,6	8,7 ± 0,2
	Наименьшее	4,8	3,1	4,1	6,5	5,9	5,6		
	Наибольшее	11,0	12,4	13,7	12,4	13,2	15,0		
Июнь	Среднее	15,3	15,0	15,3	15,4	15,8	16,5	15,3	15,4 ± 0,1
	Наименьшее	10,5	11,7	11,7	12,6	12,9	11,6		
	Наибольшее	19,1	18,9	18,9	17,8	18,5	21,0		
Июль	Среднее	18,6	18,5	18,0	18,2	18,7	18,8	18,1	18,3 ± 0,2
	Наименьшее	16,6	14,6	14,5	15,4	15,6	15,5		
	Наибольшее	22,7	21,8	21,0	20,9	22,2	21,5		
Август	Среднее	15,5	15,2	15,2	15,1	15,2	15,9	15,2	15,1 ± 0,1

Месяц	Значение	Годы, номер климатического периода						[Справочник, 1965] (1881–1960)	[Научно-при- кладной..., 1993] (1881–1980)
		1841– 1870	1871– 1900	1901– 1930	1931– 1960	1961– 1990	1991– 2020		
		1	2	3	4	5	6		
Сентябрь	Наименьшее	13,3	12,8	10,1	12,4	12,6	12,5	9,2	9,3 ± 0,2
	Наибольшее	18,5	17,4	18,4	18,4	17,5	18,4		
	Среднее	8,6	9,3	9,2	9,3	9,2	9,2		
Октябрь	Наименьшее	4,1	6,0	6,6	6,2	5,3	6,1	0,9	0,8 ± 0,2
	Наибольшее	11,0	12,1	11,9	12,0	12,9	12,3		
	Среднее	0,0	0,6	0,5	1,5	0,6	2,0		
Ноябрь	Наименьшее	–4,8	–5,1	–5,8	–2,0	–4,2	–2,4	–10,4	–10,1 ± 0,4
	Наибольшее	5,0	3,5	4,6	5,4	4,7	5,3		
	Среднее	–11,1	–10,6	–9,4	–11,1	–8,9	–8,2		
Декабрь	Наименьшее	–18,7	–20,4	–16,2	–21,2	–17,0	–15,0	–17,8	–17,3 ± 0,4
	Наибольшее	–3,7	–2,0	–4,6	–4,8	–3,6	–1,6		
	Среднее	–17,5	–17,7	–17,5	–17,9	–15,6	–14,9		
Год	Наименьшее	–26,9	–27,5	–27,9	–27,6	–26,1	–25,0	–0,7	–0,5
	Наибольшее	–11,3	–9,5	–8,5	–9,5	–9,3	–6,8		
	Среднее	–0,8	–0,8	–0,4	–0,5	0,1	1,2		
Год	Наименьшее	–3,3	–3,0	–2,1	–2,1	–2,2	–1,4		
	Наибольшее	1,2	1,0	1,0	1,6	2,4	3,6		

По данным табл. 3 можно наглядно представить, какими были в Томске средние температурные условия (климатические нормы) в каждый из этих шести последовательных 30-летних периодов, а также самые высокие и самые низкие средние месячные температуры воздуха за тот же период. Для сравнения приведены многолетние средние месячные и средние годовые значения из [Справочник, 1965; Научно-прикладной..., 1993]. Данные по средним месячным температурам воздуха за период (1881–1980 гг.) содержат величину средней арифметической погрешности.

Изменение средних годовых температур по 30-летним периодам. Анализ 30-летних средних годовых температур приземного воздуха в Томске (рис. 1) в целом показывает постоянное повышение температуры воздуха. В Томске в первоначальный 60-летний период (1841–1900 гг.) наблюдалась самая низкая за 180 лет средняя годовая температура воздуха –0,8 °C (климатическая норма двух периодов). В следующий период (1901–1930 гг.) климатическая норма температуры повысилась на 0,4 °C.

За четвертый период (1931–1960 гг.) средняя годовая температура незначительно понизилась на 0,1 °C. За следующие 30 лет (пятый период – с 1961 по 1990 г.) температура повысилась на 0,7 °C, а затем за шестой период (1991–2020 гг.) еще возросла на 1,1 °C и достигла максимальной величины за весь период наблюдений 1,2 °C.

За пятый и шестой периоды рост температуры оказался наиболее интенсивным.

Для оценки степени значимости изменения средних годовых температур воздуха в смежные климатические периоды использовался *t*-критерий Стьюдента (табл. 5).

За первые два климатических периода с 1871 по 1900 г. климатические нормы температуры не изменились совсем, хотя в разные десятилетние периоды

колебания температуры наблюдались. В третьем климатическом периоде средняя годовая температура существенно повысилась на 0,4 °C, такое повышение температуры воздуха за 30-летний период оказалось статистически незначимым при уровне значимости 5 % ($\alpha = 0,05$).

В четвертом климатическом периоде средняя годовая температура имела тенденцию к понижению. Наблюдалось очень небольшое похолодание, тоже статистически незначимое (температура понизилась всего на 0,1 °C).

В пятом климатическом периоде (1961–1990 гг.) средняя годовая температура воздуха повысилась на 0,6 °C. Такое повышение температуры за 30-летний период стало статистически значимым фактом.

Потепление климата продолжалось и в следующем шестом климатическом периоде (1991–2020 гг.). За этот период произошло максимальное повышение температуры воздуха на 1,1 °C. Такое повышение температуры оказалось весьма существенным и статистически значимым.

Можно сделать вывод, что в течение 180 лет инструментальных наблюдений за температурой воздуха на станции Томск на протяжении 120 лет до 1960-х гг. её колебания были относительно небольшими.

Об этом можно судить и по данным климатических справочников [Справочник, 1965; Научно-прикладной..., 1993], приведённых в табл. 4.

Таким образом, в Томске за прошедшие 180 лет средние годовые температуры воздуха с первого 30-летнего периода по шестой повысились с –0,8 до 1,2 °C, т.е. на 2,0 °C. Следует отметить, что за последние 60 лет средняя годовая температура повысилась на 1,8 °C.

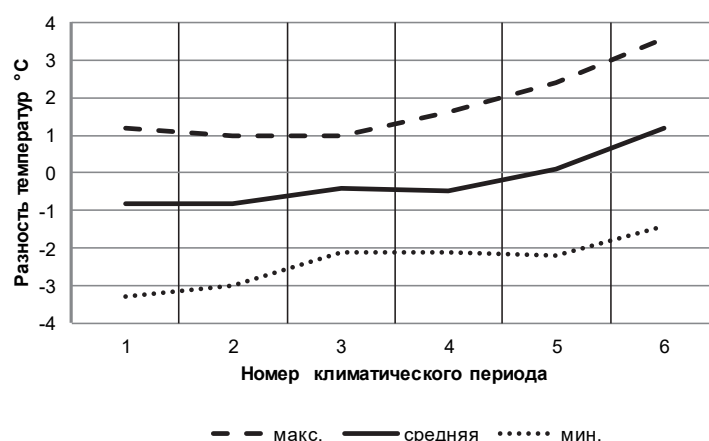


Рис. 1. Разности средних годовых температур воздуха (°C) в смежные климатические периоды. Номера климатических периодов приведены в табл. 3

Fig. 1. Differences in average annual air temperatures (°C) in adjacent climatic periods. The numbers of the climatic periods are given in Table 3

Оценка статистической значимости изменения многолетних средних годовых температур воздуха, г. Томск

Таблица 5

Table 5

Assessment of the statistical significance of changes in long-term average annual air temperatures, Tomsk

Номер 30-летних климатических периодов	Разность средних годовых температур между последующим и предыдущим 30-летием	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{табл}}$ ($\alpha = 0,05$)	Пояснение
2-1	0,0	—	2,04	Без изменения
3-2	+0,4	1,86	2,04	$t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$ незначимое повышение
4-3	-0,1	0,70	2,04	$t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$ незначимое понижение
5-4	+0,6	2,11	2,04	$t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$ значимое повышение
6-5	+1,1	3,87	2,04	$t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$ значимое повышение

Климатические изменения средних месячных температур. Изменение средних месячных температур в различные климатические периоды носят неоднозначный характер. В климатические периоды в разные месяцы наблюдаются различные тенденции изменения температурного режима. Эти изменения носят как разнонаправленный характер, так и различаются по интенсивности потепления или похолодания климата. Для оценки значимости (существенности) изменения температурного режима за отдельные месяцы использовался t -критерий Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (Исаев, 1988). Рассчитанные изменения средних месячных и средних годовых температур воздуха (°C) в смежные климатические периоды и их средние арифметические погрешности приведены в табл. 6.

Выделены разности средних месячных и годовых температур воздуха, значения повышения которых являются значимыми по t -критерию Стьюдента (при $\alpha = 0,05$). Расчетное значение t зависит от величины разности температуры и от средней арифметической погрешности средней.

На оценку значимости изменений температуры влияет различная степень естественной изменчивости температуры в различные сезоны года, которая связана с циркуляционными процессами в атмосфере. Максимальные погрешности средних арифметических значений температуры отмечаются в зимний период года, а минимальные — в летний. В зимний период отмечается максимальная изменчивость температурного режима воздуха, и, следовательно, средние квадратические отклонения.

Общее количество месяцев за год с повышением или понижением средних месячных температур воздуха по сравнению с предыдущим климатическим периодом приведено в табл. 7.

На какую величину понизилась или повысилась температура воздуха по сравнению с предыдущим периодом в данном случае не учитывалось. В целом за весь 180-летний период наблюдений в Томске отмечается увеличение числа месяцев с повышением средних месячных температур воздуха и, соответственно, уменьшение их числа с понижением температуры. Особенно заметно усилилось потепление за последние 60 лет.

Таблица 6

Изменения средних месячных и годовых температур воздуха (климатических норм)
и их средних арифметических погрешностей за различные климатические периоды, г. Томск

Table 6

Changes in average monthly and annual air temperatures (climatic norms) and their arithmetic averages
for various climatic periods, Tomsk

Месяц, год	Годы, номер климатического периода				
	1871–1900– 1841–1870	1901–1930– 1871–1900	1931–1960– 1901–1930	1961–1990– 1931–1960	1991–2020– 1961–1990
	2–1	3–2	4–3	5–4	6–5
Январь	$-0,1 \pm 0,8$	$+1,8 \pm 0,8$	$-0,7 \pm 0,8$	$+1,4 \pm 0,8$	$+0,3 \pm 0,8$
Февраль	$-0,6 \pm 0,7$	$+1,1 \pm 0,7$	$-0,3 \pm 0,7$	$-0,3 \pm 0,7$	$+2,7 \pm 0,7$
Март	$+1,6 \pm 0,6$	$-1,2 \pm 0,6$	$+0,4 \pm 0,6$	$+2,1 \pm 0,6$	$+1,8 \pm 0,6$
Апрель	$-1,2 \pm 0,5$	$-0,3 \pm 0,5$	$+0,6 \pm 0,5$	$+0,7 \pm 0,5$	$+2,6 \pm 0,5$
Май	$-0,1 \pm 0,4$	$+0,8 \pm 0,4$	$+0,1 \pm 0,4$	$+0,1 \pm 0,4$	$+1,4 \pm 0,4$
Июнь	$-0,3 \pm 0,3$	$+0,3 \pm 0,3$	$+0,1 \pm 0,3$	$+0,4 \pm 0,3$	$+0,7 \pm 0,3$
Июль	$-0,1 \pm 0,3$	$-0,5 \pm 0,3$	$+0,2 \pm 0,3$	$+0,5 \pm 0,3$	$+0,1 \pm 0,3$
Август	$-0,3 \pm 0,2$	$0,0 \pm 0,2$	$-0,1 \pm 0,2$	$+0,1 \pm 0,2$	$+0,7 \pm 0,2$
Сентябрь	$+0,7 \pm 0,3$	$-0,1 \pm 0,3$	$+0,1 \pm 0,3$	$-0,1 \pm 0,3$	$0,0 \pm 0,3$
Октябрь	$+0,6 \pm 0,4$	$-0,1 \pm 0,4$	$+1,0 \pm 0,4$	$-0,9 \pm 0,4$	$+1,4 \pm 0,4$
Ноябрь	$+0,5 \pm 0,7$	$+1,2 \pm 0,7$	$-1,7 \pm 0,7$	$+2,2 \pm 0,7$	$-0,7 \pm 0,7$
Декабрь	$-0,2 \pm 0,8$	$+0,2 \pm 0,8$	$-0,4 \pm 0,8$	$+2,3 \pm 0,8$	$+0,7 \pm 0,8$
Год	$0,0 \pm 0,2$	$+0,4 \pm 0,2$	$-0,1 \pm 0,2$	$+0,7 \pm 0,2$	$+1,0 \pm 0,2$

Примечание. Различие климатических норм определялось как разность температур между последующим и предыдущим периодом. Знак «плюс» означает повышение температуры, «минус» – понижение. Статистически значимые разности выделены жирным шрифтом.

Note. The difference in climatic norms was defined as the temperature difference between the following and the previous period. A plus sign means an increase in temperature, a minus sign means a decrease. Statistically significant differences are highlighted in bold font.

Таблица 7

Количество месяцев за год с относительным понижением или повышением средних температур воздуха
по сравнению с предшествующим климатическим периодом, г. Томск

Table 7

The number of months per year with a relative decrease or increase in average air temperatures compared
to the previous climatic period, Tomsk

Изменение температуры	Годы, номер климатического периода				
	(1841–1870) – (1871–1900)	(1871–1900) – (1901–1930)	(1901–1930) – (1931–1960)	(1931–1960) – (1961–1990)	(1961–1990) – (1991–2020)
	2–1	3–2	4–3	5–4	6–5
Повышение и без изменения	4	7	7	9	11
Понижение	8	5	5	3	1

Анализ изменений климатических изменений температуры воздуха в Томске (см. табл. 7) показал, что 120 лет до 1980 г. [Научно-прикладной..., 1993] температурный режим оставался достаточно устойчивым. Только средние годовые температуры за период (1901–1930 гг.) оказались выше, чем в предшествующие периоды. Потепление произошло за счёт повышения температур в месяцы холодного периода, хотя и статистически незначимых.

В целом в Западной Сибири, да и в других регионах, отмечается более интенсивный темп повышения температур воздуха в холодный период года. В летние месяцы температурный режим практически не меняется.

Например, в Томске максимально высокие июльские температуры воздуха в новом климатическом периоде (1991–2020 гг.) лишь на $0,2^\circ\text{C}$ превышают температуру воздуха в первый период (1841–1870 гг.).

Для сравнения на рис. 2 приведён вековой ход январских средних месячных температур воздуха по климатическим периодам.

Изменение средних многолетних июльских температур воздуха в различные климатические периоды приведены на рис. 3.

По данным табл. 4 следует, что за пятый период (1961–1990 гг.) особенно повысились средние температуры за март и ноябрь.

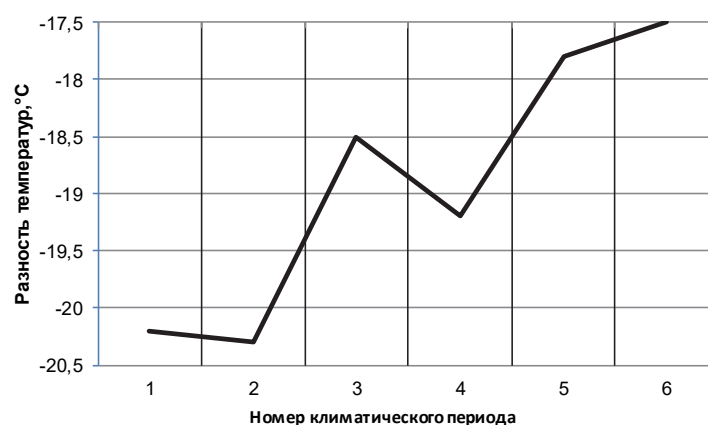


Рис. 2. Вековой ход средних месячных температур воздуха в январе в различные климатические периоды, г. Томск

Fig. 2. The secular course of average monthly air temperatures in January and July in various climatic periods, Tomsk



Рис. 3. Вековой ход средних месячных температур воздуха в июле в различные климатические периоды, г. Томск

Fig. 3. The secular course of average monthly air temperatures in July in various climatic periods, Tomsk

За шестой период (1991–2020 гг.) существенно повысились температуры уже за пять месяцев из 12 (с февраля по май и за октябрь). В новом климатическом периоде только в ноябре средняя температура оказалась ниже, чем в предшествующий климатический период. В этот же климатический период наблюдались самые высокие наименьшие и наибольшие значения средних годовых температур воздуха. Отметим, что в новом климатическом периоде в летние месяцы и в сентябре не происходило статистически значимых изменений температуры. Не было значимых изменений температуры воздуха в декабре и январе. Отсюда можно сделать вывод о том, что основные изменения в термическом режиме наблюдались главным образом в переходные сезоны года. Важно отметить, что небольшие статистически незначимые повышения температуры (тенденции) за

различные 30-летние периоды, продолжающиеся более длительное время, могут постепенно приводить к статистически значимым их изменениям за более длительные периоды. Так, например, сравнение норм температуры воздуха за первый период (1841–1870 гг.) с климатическими нормами шестого периода (1991–2020 гг.) показало, что они в большинстве месяцев и за год в целом значительно повысились. Изменение средних месячных температур в Томске с первого периода (1841–1870 гг.) по шестой (1990–2020 гг.) приведено в табл. 8.

Основной вклад в повышение температуры воздуха произошло в холодный и переходные сезоны года. С ноября по март средние температуры воздуха повысились в разные месяцы на 2,6–4,7 °C. Особенно следует отметить, что значения средних месячных температур воздуха за июль, август и сентябрь за весь

180-летний период статистически значимо не изменился.

Изменение средних годовых температур по десятилетним периодам. Представляет определённый интерес более подробная динамика температурных условий в выделенных климатических периодах отдельно по десятилетиям. В табл. 9 показаны средние годовые температуры воздуха в Томске за каждое десятилетие в климатических периодах.

Как было ранее отмечено, в первые два периода (с 1841 по 1900 г.) средние годовые температуры воздуха не менялись и составляли $-0,8^{\circ}\text{C}$. Тем не менее за десятилетия колебания средних годовых температур воздуха отмечались.

Анализ изменчивости средних годовых значений температуры за 10-летние периоды показал, что ее наибольшие статистически значимые повышения в

Томске происходили в следующие 10-летние периоды: 1851–1860 гг., 1891–1900 гг., 1981–1990 гг. и 2011–2020 гг. Самые значительные похолодания за весь 180-летний период отмечены лишь в период 1861–1870 гг. и 1931–1940 гг.

Анализ динамики средних годовых температур воздуха в Томске по десятилетиям показал особенности её временной изменчивости. В одни климатические периоды может наблюдаться как тенденция повышения температуры, так и тенденция её понижения.

Разнонаправленные тенденции изменения температуры проявляются на протяжении всего 180-летнего периода. Всё это говорит о сложных взаимодействиях главных климатообразующих процессов, происходящих в равнинных условиях южной части Западной Сибири.

Таблица 8

Изменение климатических норм средних месячных температур воздуха ($^{\circ}\text{C}$) от шестого (1991–2020 гг.) периода к первому (1841–1870 гг.), г. Томск

Table 8

Change in climatic norms of average monthly air temperatures ($^{\circ}\text{C}$) from the sixth (1991–2020) period to the first (1841–1870), Tomsk

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
+2,7	+2,6	+4,7	+3,2	+2,3	+1,2	+0,2	+0,4	+0,6	+2,0	+2,9	+2,6	+2,0

Таблица 9

Средние годовые температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) по климатическим периодам, десятилетиям и их разности (в скобках), г. Томск

Table 9

Average annual air temperatures ($^{\circ}\text{C}$) by climatic periods, decades, their differences (in parentheses), Tomsk

30-летний климатический период, годы	Десятилетние периоды, годы		
	Первое 10-летие	Второе 10-летие	Третье 10-летие
1841–1870 (период 1) $-0,8$	1841–1850 $-1,0$	1851–1860 $-0,4 (+0,6)$	1861–1870 $-0,9 (-0,5)$
1871–1900 (период 2) $-0,8$	1871–1880 $-0,9 (0,0)$	1881–1890 $-1,1 (-0,2)$	1891–1900 $-0,5 (+0,6)$
1901–1930 (период 3) $-0,4$	1901–1910 $-0,6 (-0,1)$	1911–1920 $-0,5 (+0,1)$	1921–1930 $-0,2 (+0,3)$
1931–1960 (период 4) $-0,5$	1931–1940 $-0,5 (-0,3)$	1941–1950 $-0,4 (+0,1)$	1951–1960 $-0,5 (-0,1)$
1961–1990 (период 5) $0,1$	1961–1970 $-0,1 (+0,4)$	1971–1980 $-0,1 (0,0)$	1981–1990 $0,7 (+0,8)$
1991–2020 (период 6) $1,2$	1991–2000 $1,0 (+0,3)$	2001–2010 $0,9 (-0,1)$	2011–2020 $1,7 (+0,8)$

В связи с тем, что в настоящий период времени наблюдается устойчивое потепление климата как в Западной Сибири, так и в других регионах, и это явление связано главным образом с повышением температуры воздуха в холодный период года, было проведено исследование зависимости повышения климатической

нормы температуры воздуха от повторяемости месяцев с аномально высокими температурами воздуха.

Для оценки влияния циркуляционного фактора на повышение температуры были выделены аномально теплые месяцы в холодный период года (с ноября по март) во всех климатических периодах. Критерием

для выделения аномально теплых месяцев служило превышение средней месячной температуры на величину её среднего квадратического отклонения в соответствующем месяце.

Фактическое количество аномально теплых месяцев в холодный период года в каждом климатическом периоде и их среднее число за сезон приведены в табл. 10.

Т а б л и ц а 10

Количество аномально теплых зимних месяцев в различные климатические периоды, г. Томск

Table 10

The number of abnormally warm winter months in different climatic periods, Tomsk

Показатель	Годы, номер климатического периода						% от общей суммы
	1841–1870	1871–1900	1901–1930	1931–1960	1961–1990	1991–2020	
	1	2	3	4	5	6	
Ноябрь	4	6	9	4	12	12	26
Декабрь	6	3	3	3	7	11	18
Январь	5	6	6	7	12	14	28
Февраль	5	3	2	7	5	14	19
Март	5	10	8	4	15	21	35
% от общей суммы	17	19	19	17	34	48	

За весь 180-летний период в Томске в 30-летних периодах количество аномально теплых месяцев в холодный период изменялось от 4 до 21 месяца. В климатические периоды (с первого по четвертый) с мало меняющимися средними температурами воздуха число аномально теплых месяцев изменялось от 17 до 19 % от общего числа месяцев в климатическом периоде. Анализ числа аномально теплых месяцев показал, что если их среднее количество равно 5–6 случаям за месяц, то изменения температуры не превышают в среднем 0,1–0,4 °C, что не является статистически значимым.

Увеличение числа месяцев с аномально высокими температурами воздуха в зимний период более 30 % уже приводит к существенному повышению норм средних месячных температур воздуха. В новом климатическом периоде число месяцев с аномально высокими температурами в холодный период достигло 48 % всех случаев.

По данным табл. 10 можно сделать обобщённые выводы, что наиболее сильное влияние на изменение температурного режима в Томске оказывают зимние месяцы и переходные сезоны года. Положительные аномалии средних месячных температур возникали в марте в 35 % случаев. В январе положительные аномалии температуры возникали в 28 % случаев. На положительные аномалии в ноябре приходится 26 % случаев. На декабрь и февраль соответственно приходится 18 и 19 % положительных аномалий температуры.

Влияние атмосферной циркуляции на температурный режим воздуха. Влияние атмосферной циркуляции над Западной Сибирью рассматривалось в достаточно большом количестве работ [Зубович и др., 1979; Коженкова, Рутковская, 1961; Лучицкая и др., 2014].

Синоптические процессы над Томской областью тесно связаны с процессами над всем Северным полушарием. Большое разнообразие синоптических процессы разные авторы объединили в три основных типа циркуляции: западный или зональный (W), восточный (E) и меридиональный (C). Преобладающим в умеренных широтах является западный тип циркуляции. Влияние восточного типа циркуляции также достаточно велико, особенно в холодное полугодие. Роль меридионального типа циркуляции усиливается весной и в первую половину лета [Дмитриев и др., 2018].

В зависимости от преобладания типа того или иного типа циркуляции могут наблюдаться аномалии температурных условий в отдельные сезоны года. Так, например, при хорошо развитом западном (W) переносе зимой усиливается циклоническая деятельность на юге Западной Сибири. Гребень Сибирского антициклона смещается к юго-востоку или в Восточную Сибирь. В центральных районах Западной Сибири отмечаются заметные потепления. Вероятность положительной аномалии температуры при западном переносе достигает 80 % [Коженкова, Рутковская, 1961; Зубович и др., 1979; Харюткина и др., 2019].

При циркуляции восточного типа (E) усиливается влияние сибирского антициклона на погоду в Томской области, возрастает вероятность отрицательных аномалий температуры зимой [Климат Томска, 1982].

Большая изменчивость средних месячных температур воздуха в январе затрудняет анализ соответствия повторяемости типов циркуляции и температуры воздуха.

Для оценки влияния типов циркуляции на формирование температурного режима в условиях Западной Сибири были выбраны по 10 аномально холодных (табл. 11) и аномально тёплых январей (табл. 12).

В приведённые anomalно холодные январь были выбраны повторяемости различных типов циркуляции W, C, E [Дмитриев и др., 2018] и число дней в соответствующем январе с циклонами и антициклонами [Лучицкая и др., 2014].

В случаях anomalно холодных январей преобладает повторяемость восточного типа циркуляции (E), изменяется от 21 до 31 дня за месяц. При этом западный тип циркуляции (W) был редко и не превышал семь дней.

Anomalно холодные зимы в Сибири бывают при устойчивых антициклонах над Азиатской частью

России, блокирующих проникновение в Сибирь тёплых воздушных масс с прохождением атмосферных фронтов, связанных с циклоническими образованиями. В anomalно холодные зимние месяцы повторяемость дней с циклонами – минимальная.

В случаях с anomalно тёплыми январями получены следующие выводы. В anomalно тёплые январь преобладающей формой циркуляции является западная форма (W). Довольно значительная часть дней наблюдается меридиональная форма циркуляции, приносящая тёплый воздух из южных районов.

Таблица 11

Типы циркуляции атмосферы, число дней с циклонами и антициклонами, г. Томск.
Январь. Anomalно холодные месяцы

Table 11

Types of atmospheric circulation, the number of days with cyclones and anticyclones, Tomsk.
January. Abnormally cold months

Год	Средняя месячная температура воздуха, январь, °C	Тип циркуляции, дни			Число дней с циклоном	Число дней с антициклоном
		W	E	C		
1893	–29,3	2	29	0	–	–
1900	–28,9	0	31	0	–	–
1933	–25,1	5	26	0	–	–
1940	–27,1	4	23	4	–	–
1947	–26,4	0	21	10	–	–
1969	–29,5	3	28	0	6	25
1977	–25,5	0	31	0	7	24
1979	–26,0	4	25	2	2	29
2006	–29,4	7	22	2	9	22
2010	–26,8	0	23	8	5	23
Среднее		2,5	25,9	2,6	5,8	24,6

Таблица 12

Типы циркуляции атмосферы, число дней с циклонами и антициклонами, г. Томск.
Январь. Anomalно теплые месяцы

Table 12

Types of atmospheric circulation, the number of days with cyclones and anticyclones, Tomsk.
January. Abnormally warm months

Год	Средняя месячная температура воздуха, январь, °C	Тип циркуляции, дни			Число дней с циклоном	Число дней с антициклоном
		W	E	C		
1914	–11,6	17	0	14	–	–
1925	–10,8	25	0	6	–	–
1949	–12,5	23	0	8	27	4
1964	–10,2	15	0	16	24	7
1975	–12,8	19	12	0	22	9
1983	–10,8	15	12	4	23	8
1991	–12,4	15	0	16	14	17
1992	–10,0	11	0	20	24	7
2002	–8,0	21	0	10	18	13
2007	–9,4	20	0	11	21	10
Средние		18,1	2,4	10,5	21,6	9,4

Восточная форма циркуляции (C) отмечается редко (в двух случаях из 10). Относительно высокие средние январские температуры воздуха объясняются явным преимуществом циклональной формы циркуляции над Западной Сибирью и связанной с ней повышенной повторяемостью прохождения теплых воздушных масс.

Заключение

В результате исследования температурного режима в г. Томске за 180-летний период инструментальных наблюдений можно сделать следующие выводы.

1. Одним из важнейших интегрированных показателей изменения термического режима являются

средние годовые температуры воздуха. Анализ изменений средних годовых температур в Томске по 30-летним периодам показал, что наблюдается тенденция их повышения с середины XIX в. по настоящее время. В Томске за 60-летний период (1841–1900 гг.) наблюдалась самая низкая $-0,8^{\circ}\text{C}$ средняя годовая температура воздуха. На фоне повышения средних годовых температур воздуха в Томске в период 1931–1960 гг. наблюдалось её незначительное понижение на $0,1^{\circ}\text{C}$. В следующие периоды средние годовые температуры продолжали повышаться. За период с 1961 по 1990 г. средняя годовая температура повысилась на $0,7^{\circ}\text{C}$, а затем за период 1991–2020 гг. еще возросла на $1,1^{\circ}\text{C}$. Таким образом, за 180 лет средние годовые температуры в Томске повысились с $-0,8^{\circ}\text{C}$ до $1,2^{\circ}\text{C}$, т.е. на 2°C , причем только за последние 60 лет она повысилась на $1,8^{\circ}\text{C}$. Эти последние повышения температуры стали статистически значимыми.

2. Изменения средних месячных температур в разные 30-летние климатические периоды показали различную направленность их тенденций. Одинаковые средние годовые температуры воздуха между вторым и первым климатическим периодами обусловлена была тем, что статистически незначимые похолодания были в зимние, весенние и летние месяцы (восемь месяцев), а потепление проявилось в марте и осенью (четыре месяца).

Между третьим и вторым климатическим периодом статистически значимое повышение средней годовой температуры составило $0,4^{\circ}\text{C}$. Повышение температуры определилось в связи с тем, что в течение шести месяцев наблюдался рост температуры и столько же месяцев была тенденция к её понижению, однако относительно более высокие темпы роста температуры наблюдались в холодный период года.

Наибольшее повышение температуры между пятым и четвертым, а также шестым и пятым климатическими периодами характеризовалось значительно большей повторяемостью месяцев с повышением температуры.

3. Наибольшие темпы повышения температуры воздуха отмечаются в зимний период и в переходные месяцы года. Это объясняется тем, что в условиях Западной Сибири в различные климатические периоды могут преобладать различные типы циркуляции атмосферы. При западном переносе воздушных масс сюда поступает относительно теплый воздух с Атлантики или при меридиональном переносе приходит воздух из южных районов. В летние месяцы во все климатические периоды тенденции повышения температуры являются незначимыми.

4. Исследование температуры воздуха внутри климатических периодов показало, что её изменчивость может иметь противоположные тенденции по десятилетиям. Внутри каждого 30-летнего периода есть 10-летние периоды с различными тенденциями температуры. Это говорит о большой степени случайности в проявлении различных особенностей общей циркуляции атмосферы. Отметим, что даже в самый тёплый климатический период 1991–2020 гг. десятилетие 2001–2010 гг. оказалось прохладнее, чем предыдущее десятилетие.

5. При современных условиях потепления климата следует учитывать возможности появления экстремальных режимов температуры воздуха. В зимние месяцы могут наблюдаться экстремально низкие значения температуры воздуха, такие как в прошлые более холодные климатические периоды. Например, на станции Томск в январе в пятом и шестом теплых климатических периодах наблюдались самые высокие средние месячные температуры воздуха $-17,8^{\circ}\text{C}$ и $-17,5^{\circ}\text{C}$ соответственно. В то же время наименьшие средние месячные температуры в эти периоды были равны $-29,5^{\circ}\text{C}$ в январе 1969 г. и $-29,4^{\circ}\text{C}$ в январе 2006 г. Эти минимальные температуры оказались ниже, чем в предшествующие более холодные климатические периоды.

6. Основной причиной современного изменения температурного режима в Сибири, вероятно, следует считать изменения в повторяемости различных форм циркуляции атмосферы. Интенсивное повышение средних месячных и годовых температур последних периодов времени подтверждается значительным увеличением аномально тёплых месяцев в зимние и переходные периоды за последние десятилетия. Повышения средних месячных температур воздуха зимой на $3-5^{\circ}\text{C}$ могут быть вызваны только приходом относительно теплых воздушных масс при западном переносе и уменьшением влияния восточного и меридионального переноса воздушных масс из Арктики.

Несомненно, на современные изменения климата влияет очень большое количество различных факторов, в том числе и антропогенные, которые очень сложно учесть. Результаты исследований свидетельствуют о неоднозначном влиянии на глобальные изменения климата особенностей общей циркуляции атмосферы в разных регионах России и, в частности, в Сибири. Есть все основания считать, что особенности изменения термического режима могут существенно отличаться в арктических и в горных районах Сибири. В связи с этим требуется детальное изучение региональных изменений режима температуры воздуха с целью разработки методов её прогнозирования.

Список источников

- Алисов Б.П., Дроздов О.А., Рубинштейн Е.С. Курс климатологии. Л. : Гидрометеиздат, 1952. 487 с.
Будыко М.И. Климат и жизнь. Л. : Гидрометеиздат, 1971. 472 с.

- Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л. : Гидрометеиздат, 1980. 351 с.
- Виллет Х.К. Характер связи солнечных и климатических явлений / Солнечная активность и изменения климата. Л. : Гидрометеиздат, 1962. С. 15–25.
- Вителъ Л.А. Аномалии циклического хода солнечной активности и тенденция современных колебаний климата // Труды ГГО. 1962. Вып. 133. С. 35–55.
- Вознесенский А.В., Шостакович В.Б. Основные данные для изучения климата Восточной Сибири. Иркутск : Типо-литография П.И. Макушина и В.М. Посохина, 1913. 222 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М. : Планета, 2014. 58 с.
- Геденов А.Д. Изменения температуры воздуха на северном полушарии за 90 лет. Л. : Гидрометеиздат, 1973. 146 с.
- Гирс А.А., Кондратович К.В. Методы долгосрочных прогнозов погоды. Л. : Гидрометеиздат, 1978. 342 с.
- Давитая Ф.Ф. О возможности влияния запыленности атмосферы на уменьшение ледников и потепление климата // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1965. № 2. С. 3–23.
- Дмитриев А.А., Дубравин В.Ф., Белязо В.А. Атмосферные процессы Северного полушария (1891–2018 гг.), их классификация и использование. СПб. : СУПЕР Издательство, 2018. 306 с.
- Доклад о научно-методических основах для разработки стратегии адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенций Росгидромета). Санкт-Петербург ; Саратов : Амирит, 2020. 120 с.
- Заде Г.О., Русанов В.И., Севастьянова Л.М., Севастьянов В.В. Современные тенденции климатических изменений в Томске // Актуальные проблемы биологии, медицины и экологии. 2004. Т. 3, № 4. С. 41–42.
- Зубович М.Г., Тарасенко В.Д., Токарев В.Г., Шкапоид М.А., Ягудин Р.А. Синоптические условия формирования крупных аномалий средней месячной температуры воздуха в Западной Сибири // Тр. ЗСРНИГМИ. 1979. Вып. 42. С. 24–36.
- Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М. : Изд-во МГУ, 1988. 288 с.
- Климат Томска. Л. : Гидрометеиздат, 1982. 176 с.
- Коженкова З.П., Рутковская Н.В. Климат Томской области и его формирование // Вопросы географии Сибири. 1961. Вып. 6. С. 3–39.
- Лучицкая И.О., Белая Н.И., Арбузов С.А. Климат Новосибирска и его изменения. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. 224 с.
- Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М. : Высшая школа, 1988. 239 с.
- Масленников Н.И. Климат Томска // Тр. Томского гос. ун-та. Т. 95: География. Томск : Красное Знамя, 1939. С. 31–75.
- Международная конференция директоров метеорологических служб. Варшава / Главное упр. Гидрометеорол. службы СССР при СНК СССР. Л. ; М. : Гидрометеорол. изд., Типо-лит Гидрометеиздат, 1937.
- Монин А.С. Введение в теорию климата. Л. : Гидрометеиздат, 1982. 247 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Вып. 20, ч. 1–6. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 717 с.
- Переведенцев Ю.П., Васильев А.А. Изменение климата и его влияние на сельское хозяйство // Метеорология и гидрология. 2023. № 9. С. 5–13.
- Приказ Росгидромета «О внедрении актуализированных климатических норм в оперативно-производственную практику подведомственных учреждений Росгидромета» от 18.02.2022 г. № 64.
- Рубинштейн Е.С., Полозова Л.Г. Современное изменение климата. Л. : Гидрометеиздат, 1966. 268 с.
- Русанов В.И. Многолетний ход температуры воздуха в Томске // Природа. 1958. № 8. С. 28–35.
- Справочник по климату СССР : В 34 вып., в 5 ч. Л. : Гидрометеиздат, 1965. Вып. 20, ч. 2: Температура воздуха и почвы. 396 с.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб. : Научное издание, 2022. 676 с.
- Харюткина Е.В., Логинов С.В., Усова Е.И. Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX – начале XXI веков // Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. Томск, 2019. URL: http://downloads.igce.ru/journals/FAC/FAC_2019/FAC_2019_2/Kharyutkina_E_V_et_al_FAC_2019_2.pdf (дата обращения: 15.05.2023).
- Чижов О.П., Тареева А.М. Возможности оценки ледовитости Арктического бассейна и его изменений // Материалы гляциологических исследований. 1969. Вып. 15. С. 57–73.
- АISORI-M.METEO.RU – профессиональный интернет портал метеорологических данных. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (дата обращения: 15.05.2023).
- Callender G.S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1938. V. 64, No. 27. P. 223–240.
- Möller F. On the influence of changes in the CO₂ concentration in air on the radiation balance on the Earth's surface and on the climate // Journ. Geophys. Res. 1963. V. 68, No. 13. P. 3877–3896.
- Plass G.H. Carbon dioxide theory of climatic change // Tellus. 1956. V. 8, No. 2. P. 140–154.

References

- Alisov B.P., Drozdov O.A., Rubinshteyn E.S. *Kurs klimatologii* [Climatology course]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1952. 487 p. In Russian
- Budyko M.I. *Klimat i zhizn'* [Climate and life]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. 472 p. In Russian
- Budyko M.I. *Klimat v proshlom i budushchem* [Climate in the past and future]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 351 p. In Russian
- Villet Kh.K. *Kharakter svyazi solnechnykh i klimaticheskikh yavleniy* [The nature of the relationship between solar and climatic phenomena] / *Solnechnaya aktivnost' i izmeneniya klimata* [Solar activity and climate change]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1962. pp. 15–25. In Russian
- Vitel's L.A. *Anomalii tsiklicheskogo khoda solnechnoy aktivnosti i tendentsiya sovremennykh kolebaniy klimata* [Anomalies of the cyclical course of solar activity and the trend of modern climate fluctuations] // *Trudy GGO*. 1962. Vyp. 133. pp. 35–55. In Russian

- Voznesenskiy A.V., Shostakovich V.B. *Osnovnye dannye dlya izucheniya klimata Vostochnoy Sibiri* [Basic data for studying the climate of Eastern Siberia]. Irkutsk: Tipo-litografiya P.I. Makushina i V.M. Posokhina, 1913. 222 p. In Russian
- Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshchee rezyume [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation. General Summary]. 2014. Moscow: FGBU NITs «Planeta». 58 p. In Russian
- Gedeonov A.D. *Izmeneniya temperatury vozdukh na severnom polusharii za 90 let* [Changes in air temperature in the northern hemisphere over 90 years]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 146 p. In Russian
- Girs A.A., Kondratovich K.V. *Metody dolgosrochnykh prognozov pogody* [Methods of long-term weather forecasts]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 342 p. In Russian
- Davitaya F.F. *O vozmozhnosti vliyaniya zaplyennosti atmosfery na umen'shenie lednikov i poteplenie klimata* [On the Possibility of Atmospheric Dust Influence on the Reduction of Glaciers and Global Warming]. // *Izv. AN SSSR. Ser., geogr.* 1965. No. 2. pp. 3–23. In Russian
- Dmitriev A.A., Dubravina V.F., Belyazov V.A. *Atmosfernye protsessy Severnogo polushariya (1891–2018 gg.), ikh klassifikatsiya i ispol'zovanie* [Atmospheric processes of the Northern Hemisphere (1891–2018), their classification and use]. St.Petersburg: SUPER Izdatel'stvo, 2018. 306 p. In Russian
- Doklad o nauchno-metodicheskikh osnovakh dlya razrabotki strategii adaptatsii k izmeneniyam klimata v Rossiyskoy Federatsii (v oblasti kompetentsiy Rosgidrometa)* [Report on the scientific and methodological basis for developing a strategy for adaptation to climate change in the Russian Federation (within the competence of Roshydromet)] St. Petersburg; Saratov: Amirit, 2020. 120 p. In Russian
- Zadde G.O., Rusanov V.I., Sevast'yanova L.M., Sevast'yanov V.V. *Sovremennyye tendentsii klimaticheskikh izmeneniy v Tomske* [Current trends of climate change in Tomsk] // *Aktual'nye problemy biologii, meditsiny i ekologii* [Current issues in biology, medicine and ecology], 2004. T. 3, No. 4. pp. 41–42. In Russian
- Zubovich M.G., Tarasenko V.D., Tokarev V.G., Shkapov M.A., Yagudin R.A. *Sinopticheskie usloviya formirovaniya krupnykh anomalii sredney mesyachnoy temperatury vozdukh v Zapadnoy Sibiri* [Synoptic conditions for the formation of large anomalies of average monthly air temperature in Western Siberia] // *Tr. ZSRNIGMI*. 1979. Vyp. 42. 1979. pp. 24–36. In Russian
- Isaev A.A. *Statistika v meteorologii i klimatologii* [Statistics in meteorology and climatology]. Moscow: Izd-vo MGU, 1988. 288 p. In Russian
- Klimat Tomska* [Climate of Tomsk]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 176 p. In Russian
- Kozhenkova Z.P., Rutkovskaya N.V. *Klimat Tomskoj oblasti i ego formirovanie* [Climate of Tomsk region and its formation] // *Voprosy geografii Sibiri* [Questions of the geography of Siberia]. 1961. Vyp. 6. pp. 3–39. In Russian
- Luchitskaya I.O., Belaya N.I., Arbuzov S.A. *Klimat Novosibirsk i ego izmeneniya* [Climate of Novosibirsk and its changes]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2014. 224 p. In Russian
- L'vovskiy E.N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods for constructing empirical formulas]. Moscow : Vysshaya shkola, 1988. 239 p. In Russian
- Maslennikov N.I. *Klimat Tomska* [Climate of Tomsk] // *Tr. Tomskogo gos. un-ta. Tom 95, Geografiya*. Tomsk: Izd-vo «Krasnoe Znamya», 1939. pp. 31–75. In Russian
- Mezhdunarodnaya konferentsiya direktorov meteorologicheskikh sluzhb* [International Conference of Directors of Meteorological Services]. Varshava. / Glavnoe upr. Gidrometeorol. sluzhby SSSR pri SNK SSSR. Leningrad: Moscow : Gidrometeorol. Izd., Tipo-lit Gidrometeoizdat, 1937. In Russian
- Monin A.S. *Vvedenie v teoriyu klimata* [Introduction to Climate Theory]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 247 p. In Russian
- Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye* [Scientific and Applied Handbook on the Climate of the USSR. Series 3. Long-term data]. Vyp. 20, ch. 1–6. St. Petersburg.: Gidrometeoizdat, 1993. 717 p. In Russian
- Perevedentsev Yu.P., Vasil'ev A.A. *Izmenenie klimata i ego vliyanie na sel'skoe khozyaystvo* [Climate change and its impact on agriculture] // *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology]. 2023. No. 9. pp. 5–13. In Russian
- Prikaz Rosgidrometa «O vnedrenii aktualizirovannykh klimaticheskikh norm v operativno-proizvodstvennuyu praktiku podvedomstvennykh uchrezhdeniy Rosgidrometa» ot 18.02.2022 g. [Order of Roshydromet "On the implementation of updated climate standards in the operational and production practices of subordinate institutions of Roshydromet" dated 18.02.2022] № 64. In Russian
- Rubinshteyn E.S., Polozova L.G. *Sovremennoe izmenenie klimata* [Modern climate change]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966. 268 p. In Russian
- Rusanov V.I. *Mnogoletniy khod temperatury vozdukh v Tomske* [Long-term air temperature variation in Tomsk] // *Priroda*. 1958. No. 8. pp. 28–35. In Russian
- Spravochnik po klimatu SSSR* [Handbook of the climate of the USSR]: V 34 vyp., v 5 ch. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965. Vyp. 20, ch. 2: *Temperatura vozdukh i pochvy*. 396 p. In Russian
- Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [The Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation] / pod red. V. M. Kattsova; Rosgidromet. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022. 676 p. In Russian
- Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Usova E.I. *Tendentsii izmeneniya ekstremal'nosti klimata Zapadnoy Sibiri v kontse XX – nachale XXI vekov* [Trends in Changes in Climate Extremeness in Western Siberia in the Late 20th – Early 21st Centuries] // Institut monitoringa klimaticheskikh i ekologicheskikh sistem SO RAN. Tomsk, 2019. Electronic resource URL: http://downloads.igce.ru/journals/FAC/FAC_2019/FAC_2019_2/Kharyutkina_E_V_et_al_FAC_2019_2.pdf (Date of accessed 15.05.2023). In Russian
- Chizhov O.P., Tareeva A.M. *Vozmozhnosti otsenki ledovitosti Arkticheskogo basseyna i ego izmeneniy* [Possibilities of assessing the ice cover of the Arctic basin and its changes] // *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy* [Materials of glaciological studies]. 1969. Vyp. 15. pp. 57–73. In Russian
- AIORI-M.METEO.RU – *professional'nyy internet portal meteorologicheskikh dannykh* [professional internet portal of meteorological data]. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (Date of accessed: 15.05.2023). In Russian

Callender G.S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1938. V. 64. No. 27. pp. 223–240.

Möller F. On the influence of changes in the CO₂ concentration in air on the radiation balance on the Earth's surface and on the climate // Journ. Geophys. Res. 1963. V. 68. No. 13. pp. 3877–3896.

Plass G.H. Carbon dioxide theory of climatic change. Tellus. 1956. V. 8. No. 2. pp. 140–154.

Информация об авторе:

Севастьянов В.В., доктор географических наук, профессор кафедры метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: vvs187@mail.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Author information:

Sevastyanov V.V., Dr. Sci. (Geography), Professor, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: vvs187@mail.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.01.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 26.01.2024; approved after reviewing 05.06.2024; accepted for publication 29.08.2025