ГЕОФИЗИКА

УДК 504.3.054
https://doi.org/ 10.47928/1726-9946-2025-25-4-53-69
JTTAQW
Научная статья

Глобальные и региональные изменения климата: причины и последствия

А. А. Ташилова

Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия
tashilovaa@mail.ru

Аннотация. В работе в краткой форме были затронуты актуальные проблемы современного мира: изменение климата (глобального, регионального) причины и возможные последствия. Для различных временных масштабов приводятся причины изменения климата. Обсуждается как антропогенная природа современного изменения климата, так и особенности изменений климата, которые не укладываются в теорию их антропогенного происхождения. Показано, что изменения климата в современный период происходят всё более интенсивно. Перечисляются последствия этих изменений в мире, в России и в Кавказском регионе. Для Кавказского региона наиболее остро стоит проблема изменения водного баланса за счет деградации ледников Кавказа, обусловленных современными темпами потепления, как показано, особенно в летний сезон. Приводятся прогнозы из Докладов Международной группы по изучению климата о состоянии ледников к 2100 году по возможным сценариям RCP (Representative Concentration Pathways).

Ключевые слова: климат, температура, потепление, парниковый эффект, антропогенный, Кавказский регион, деградация ледников, водный баланс.

Финансирование. Статья подготовлена с использованием результатов выполнения НИР по теме 3.2.3 «Мониторинг и исследование изменений климата в различных климатических зонах юга ЕТР, анализ их последствий для гидрометеорологического режима, водных и агроклиматических ресурсов. Разработка методов снижения рисков в различных сферах деятельности, связанных с изменениями климата» Плана научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета ... на 2025 год (утвержден приказом Росгидромета от 26.12.2024 № 416).

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор участвовал в написании статьи и полностью несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

Для цитирования. *Ташилова А. А.* Глобальные и региональные изменения климата: причины и последствия // Доклады АМАН. 2025. Т. 25, № 4. С. 53–69. DOI: https://doi.org/10.47928/1726-9946-2025-25-4-53-69; EDN: JTTAQW

GEOPHYSICS

UDC 504.3.054 Original article

Global and regional climate change: causes and consequences

Alla A. Tashilova

High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia
tashilovaa@mail.ru

Abstract. This paper briefly addresses pressing issues of the modern world: climate change (global and regional), its causes, and potential consequences. The causes of climate change are presented for various time scales. Both the anthropogenic nature of modern climate change and the characteristics of climate change that do not fit into the theory of their anthropogenic origin are discussed. It is shown that climate change in the modern period is occurring increasingly intensively. The consequences of these changes worldwide, in Russia, and in the Caucasus region are listed. For the Caucasus region, the most pressing problem is changes in the water balance due to the degradation of Caucasus glaciers caused by current rates of warming, as shown, especially in the summer season. Forecasts from the IPCC Glacier Reports to 2100 under possible RCP (Representative Concentration Pathways) scenarios are provided.

Keywords: climate, temperature, warming, greenhouse effect, anthropogenic, Caucasus region, glacier degradation, water balance.

Funding. This article was prepared using the results of research work on topic 3.2.3 "Monitoring and studying climate change in various climatic zones of the southern European Russian region, analysis of their consequences for the hydrometeorological regime, water and agroclimatic resources. Development of methods for reducing risks in various areas of activity related to climate change"of the Roshydromet Research and Technological Work Plan for 2025 (approved by Roshydromet Order No. 416 dated December 26, 2024).

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. The author participated in the writing of the article and is fully responsible for submitting the final version of the article to the press.

For citation. *Tashilova A. A.* Global and regional climate change: causes and consequences. Adyghe Int. Sci. J. 2025. Vol. 25, No. 4. Pp. 53–69. DOI: https://doi.org/10.47928/1726-9946-2025-25-4-53-69; EDN: JTTAQW

Введение.

Современная тенденция к потеплению существенно нарушила стабильность глобальной климатической системы. В отчете Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2014) и Климатической доктрине Российской Федерации говорится, что изменение климата является одной из важнейших международных проблем 21 века, выходящих за рамки научной проблемы [1], [2].

Термины «глобальное потепление» и «изменение климата» иногда используются как взаимозаменяемые, но «глобальное потепление» – это лишь один из аспектов изменения климата. Глобальное потепление – это долгосрочное повышение температуры поверхности Земли, наблюдаемое с доиндустриального периода (1750–1900 гг.) из-за деятельности человека, в первую очередь сжигания ископаемого топлива, которое приводит к повышению уровня парниковых газов в атмосфере Земли. Понятие «изменение климата» включает в себя глобальное потепление, но относится к более широкому спектру изменений, происходящих на нашей планете [3]. К ним относятся повышение уровня моря, таяние горных ледников, ускоренное таяние льдов в Гренландии, Антарктиде и Арктике, а также изменение сроков цветения растений.

Изменение климата Земли и его причины.

Климат – одна из сложнейших систем на Земле, он складывается из взаимодействия огромного количества факторов и подвержен значительным изменениям. Климат Земли менялся на протяжении всей истории. Признаки изменения климата в прошлом достоверно демонстрирует научная информация, полученная из природных источников на разных временных масштабах: осадочные океанические породы – от миллионов до миллиарда лет, ледяные керны – от 800000 до сотен лет, годичные кольца – сотни лет и др.) и современного оборудования (спутники, инструменты).

На рисунке 1 представлен график средней глобальной температуры за последние 66 млн лет (черная кривая), построенный в рамках международного проекта CENOGRID (Cenozoic Global Reference benthic foraminifer carbon and oxygen Isotope Dataset) [4]. Температура за последние 25 тыс. лет – это зеленая кривая, построенная, на основе изучения ледяных кернах и по данным инструментальных наблюдений за последние 150 лет из базы HadCRUT (Hadley Centre/Climatic Research Unit Temperature, Великобритания).

Аномалии температуры (по оси y) – это отклонения от среднего значения глобальной температуры за период 1961–1990 гг. Для временного интервала 2000–2300 гг. (по оси x) приведены три сценария RCP изменения глобальной температуры. RCP (Representative Concentration Pathways, репрезентативные траектории концентраций) представляют собой сценарии МГЭИК, включающие временные ряды выбросов всего набора парниковых газов, аэрозолей, данные о землепользовании, которые могут привести к разным уровням глобального потепления. Они используются для прогнозирования климатических изменений и были официально приняты МГЭИК. Цифры в RCP обозначены по возможному диапазону значений радиационного воздействия в 2100 году (2,6, 4,5, 6 и 8,5 Вт/м^2) [1]:

- RCP 1.9 – это путь, ограничивающий глобальное потепление до уровня ниже 1,5 °C, что являлось желательной целью Парижского соглашения (2015 г.), но уже неосуществимой.

Всемирная метеорологическая организация (ВМО) признала 2024 год самым жарким годом на Земле за весь период проведения инструментальных наблюдений, то есть с 19-го века. Рост среднемировой температуры, по оценкам ВМО, составил 1,55 градуса, то есть была превышена пороговая отметка в 1,5 градуса, фигурирующая в Парижском соглашении по климату.

- RCP 2.6 – это «очень строгий» путь. Согласно этому сценарию, выбросы двуокиси углерода (CO_2) должны быть сведены к нулю к 2100 г. RCP 2.6, вероятно, удержит рост глобальной температуры ниже 2° С к 2100 году.

- RCP 8.5 представляет собой сценарий с высокими выбросами парниковых газов при отсутствии политики по борьбе с изменением климата, что приводит к росту температуры до 5 °C. Остальные RCP 3.4, 4.5, 6.0, 7.5 описываются МГЭИК как промежуточные сценарии.

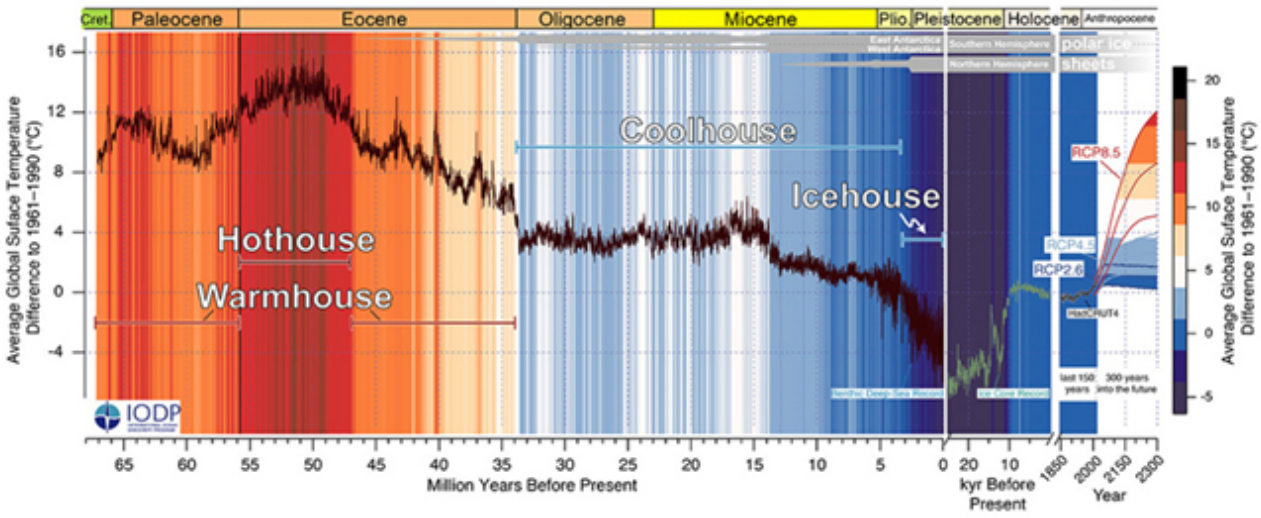

Рис. 1. График средней глобальной температуры за последние 66 млн лет, построенный в рамках международного научно-исследовательского проекта CENOGRID (Ист.: [4])
Fig. 1. A graph of the average global temperature over the past 66 million years, constructed within the framework of the international research project CENOGRID (Source: [4])

Продолжая исторический экскурс по изменению климата, отметим, что современный климат сформировался в четвертичный период, начавшийся 2,58 млн. лет назад, он подразделяется на две основные геологические эпохи: плейстоцен и голоцен и характеризуется чередованием ледниковых и межледниковых эпох. Всего за последние 800000 лет произошло восемь циклов ледниковых периодов и более теплых периодов. Сейчас мы живем в теплую межледниковую эпоху, голоцен – межледниковая эпоха с относительно стабильным климатом (начался 11,7 тыс. лет назад и продолжается до сих пор).

Директор Главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова профессор Катцов В. М. коротко и емко охарактеризовал причины изменений климатической системы: «Климатическая система эволюционирует во времени под воздействием собственной динамики, и подвергается внешним воздействиям разного происхождения. . . . В последние полторы сотни лет все более и более ощутимым становится антропогенное внешнее воздействие, связанное с изменением состава атмосферы и изменением в землепользовании и некоторыми другими менее значимыми вещами» (из выступления на 427 пленарном заседании «Время эксперта» Совета Федерации 17 января 2018 г., [5]). Таким образом, в современный период изменения климата во времени могут быть обусловлены как естественными (природными), так и антропогенными причинами. Академик Котляков В. М. в работе [6] определяет место современного климата в ряду последних четырех климатических циклов следующим образом: «. . . несмотря на возможное антропогенное

воздействие, колебания температуры на Земле не выходят за рамки естественных изменений, характерных для последней геологической эпохи». Профессор Кислов А. В. в работе [7] уточняет необходимость учета временных масштабов, в которых рассматривается изменчивость климата: «... климату свойственны колебания. Ледниковая эпоха сменяется межледниковой примерно один раз в 100 тысяч лет. Если брать последние 100 миллионов лет, то мы живём в весьма холодную пору, всё зависит от того, какой временной масштаб мы рассматриваем».

Климатическая система реагирует на изменение различных внешних воздействий на разных временных интервалах:

- в масштабе миллиардов и миллионов лет – это тектонические движения и изменение светимости Солнца;

- в масштабе десятков и сотен тысяч лет – это вариации светимости солнца, медленное изменение орбитальных параметров Земли (прецессия оси, нутации, изменение эксцентриситета орбиты) с периодичностью 23 тыс., 46 тыс. и 100 тыс. лет.), так называемые циклы Миланковича [8];

- в масштабе сотен и десятков лет – это изменение концентрации парниковых газов (природные и антропогенные факторы);

- в масштабе нескольких лет – это вулканические извержения с кратковременным эффектом охлаждения атмосферы.

В работе [8] М. Миланковича сделан вывод, что на климат на Земле оказывают влияние три цикла, связанные с прецессией, нутацией и изменением орбиты Земли. Когда они усиливают друг друга, можно ожидать похолодания и наступления ледникового периода. Однако в норме эти три фактора действуют в разных направлениях и их влияние не суммируется, так что климат быстро возвращается в обычное состояние.

Изменения глобальной средней температуры на Земле были обычно довольно медленными. Даже наиболее резкие изменения в циклах Миланковича шли со скоростью примерно 1–1,5°C за 10 тыс. лет. Скорость изменений с середины 20-го века беспрецедентна за последние 10000 лет: сейчас рост температуры на 1,0°C с постиндустриальной эпохи (конец 19-го века) произошел примерно за 150 лет. В этом заключается существенная разница между потеплением в исторические эпохи и современным.

Накопленный эффект антропогенного воздействия внес коррективы в циклы Миланковича, находящиеся сейчас в тренде похолодания. Изменение орбитальных параметров Земли могли бы в отдаленной перспективе привести к новому периоду оледенения, если бы не антропогенное факторы. Скорость современного изменения климата и тенденция глобального потепления (Рис. 2), наблюдавшаяся с середины 20-го века, является последствием потепления, которое вызвано главным образом антропогенным влиянием – сжиганием ископаемого топлива и выбросом в атмосферу парниковых газов. Анализ климатических моделей с учетом различных групп независимых переменных показал, что на современном этапе увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере из-за сжигания ископаемого топлива (антропогенный фактор) оказывает на наблюдающееся потепление гораздо более существенное влияние, чем другие факторы, в том числе и естественные (Рис. 3).

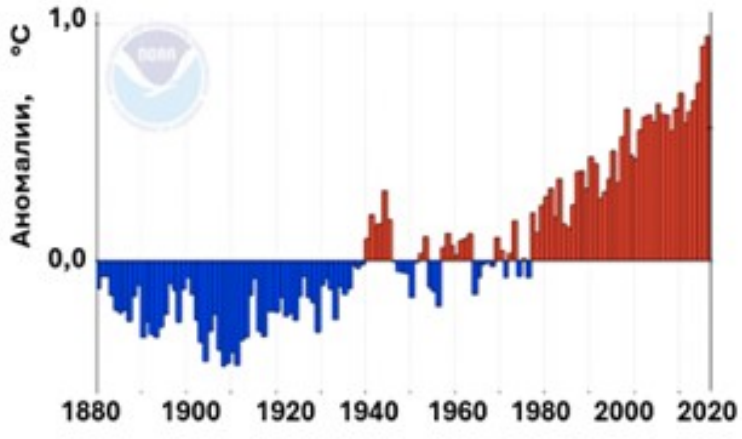

Рис. 2. Аномалии годовых глобальных температуры (суши и океана) с 1880 по 2020 год по сравнению со средними значениями в XX веке (Ист.: Национальные центры экологической информации NCEI и исследования океана и атмосферы NOAA)
Fig. 2. Annual global temperature anomalies (land and ocean) from 1880 to 2020 compared to the 20th-century average (Source: NCEI National Centers for Environmental Information and NOAA Oceanic and Atmospheric Research)

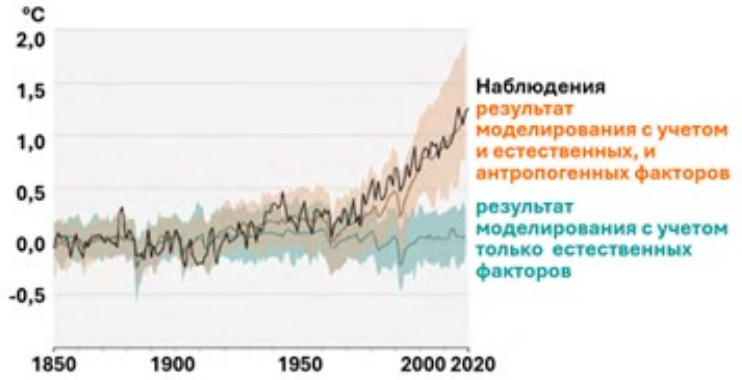

Рис. 3. Изменение среднегодовой температуры по данным инструментальных наблюдений (черная кривая) и данных моделирования в приповерхностном слое в 1850–2020 гг. (ист.: МГЭИК, 2021)
Fig. 3. Change in mean annual temperature based on instrumental observations (black curve) and modeling data in the near-surface layer in 1850–2020 (source: IPCC, 2021)

Как отмечается в публикации Сантера Б. [9] с 2016 года степень уверенности в том, что изменение климата вызвано деятельностью человека, достигла 99,9999 % вероятности неслучайного результата.

Ученые связывают тенденцию глобального потепления, наблюдавшуюся с середины 20-го века, с антропогенным усилением «парникового эффекта», суть которого заключается в том, что атмосферный воздух пропускает коротковолновую радиацию от Солнца и не выпускает длинноволновую радиацию, излучаемую Землей. Парниковые газы, которые присутствуют в атмосфере (углекислый газ, водяной пар, метан и др.), препятствуют

тому, чтобы это длинноволновое излучение полностью уходило от Земли. Удерживается это тепло в нижней тропосфере и приводит к ее нагреванию. Растущая концентрация парниковых газов в результате деятельности человека значительно нагревает планету, что негативно влияет на экосистемы и наш образ жизни.

При этом надо не забывать, что парниковый эффект необходим для жизни на Земле. При отсутствии парникового эффекта средняя температура на поверхности Земли была бы «–17,8°C», тогда как сейчас средняя температура Земли «+15,6°C» и условия для жизни благоприятны. Однако дальнейшее повышение этой температуры чревато неприятностями.

Как известно, пятью ключевыми парниковыми газами являются водяной пар (36–70 % парникового эффекта), углекислый газ (9–26%), метан(4–9%), озон(3–7%), закись азота, хлорфторуглероды. До промышленной революции (1750–1900 гг.) содержание CO_2 менялось в такт ледниковых циклов – от 180 ppm (ppm – количество частей на миллион) во время оледенений и примерно до 280 ppm в межледниковье (рис. 4). И за все эти 800000 лет оно не было столь высоким как сейчас. В 2013 году суточный уровень содержания углекислого газа в атмосфере впервые в истории человечества превысил 400 частей на миллион. В последний раз такой высокий уровень наблюдался около трёх-пяти миллионов лет назад. В 2020 г. содержание CO_2 превысило 415 ppm – это в 1,5 раза больше, чем до начала промышленной революции. Рост идет именно за счет сгорания ископаемого топлива. Растения усваивают изотоп C^{12}, а не C^{13}. Именно рост легкого изотопа обнаруживается в атмосфере. Примерно половина антропогенного CO_2 захватывается океаном и улавливается растениями, столько же остается в атмосфере. Сейчас в атмосфере содержится около 3200 Гт (гигатонн) CO_2.

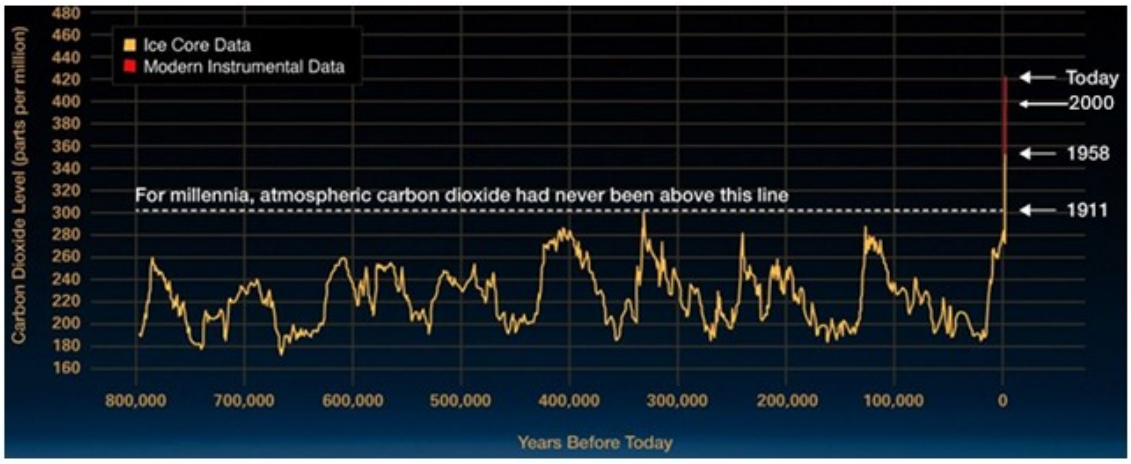

Рис. 4. Уровень углекислого газа (ppm) в атмосфере за период 800000 лет (желтая кривая – по изотопным данным ледяного керна Антарктиды, красная – по инструментальным измерениям) (Ист.: Science (2007). 317 (5839): 793–796)

Fig. 4. Carbon dioxide levels (ppm) in the atmosphere over a period of 800,000 years (yellow curve – based on isotopic data from Antarctic ice cores, red – based on instrumental measurements) (Source: Science (2007). 317 (5839): 793–796)

Таким образом, изучение современного беспрецедентного роста температуры как на суше, так и в океане, как в Южном полушарии, так и Северном, является научной проблемой, которая привлекала и привлекает большое внимание исследователей [10]–[15].

Кроме двух крайних точек зрения на основные причины, вызывающие рост глобальной температуры (естественные причины и антропогенные выбросы углекислого газа в атмосферу), существуют некоторые другие мнения о причинах глобального потепления, в том числе мнение о роли водяного пара. В интервью с профессором РАН Гущиной Д. Ю. [16] отмечается, что несмотря на то, что водяной пар – очень мощный парниковый газ и его содержание в атмосфере в последние два десятилетия растет, все-таки надо учитывать, что концентрация водяного пара сильно меняется практически ежеминутно и регионально, и это колебания, а не тренд. Является неоспоримым фактом то, что рост концентрации CO_2 был весьма существенным за счет антропогенного воздействия и продолжает увеличиваться. Кроме этого, есть физические ограничения роста содержания водяного пара в атмосфере. Накопление его в атмосфере имеет верхний предел (согласно уравнения Клапейрона–Клаузиуса), после состояния насыщения при определенной температуре и давлении, пар конденсируется и выпадает в виде осадков. Такого ограничения в накоплении углекислого газа в атмосфере, к сожалению, не имеется. По прогнозам МГЭИК в случае реализации жесткого сценария RCP 8.5 концентрация CO_2 в атмосфере к 2100 году достигнет более 1000 ppm.

В заключении приведенного обзора об изменении климата, о современном глобальном потеплении и его причинах, хочется привести вывод из официального документа международной группы экспертов по изучению климата. В отчете 6-го Доклада МГЭИК (2022 г.) [16] сделан вывод о почти линейной зависимости между совокупными антропогенными выбросами CO_2 и вызываемым ими глобальным потеплением, а именно: увеличение глобальной температуры примерно на 0,45°C обусловлено выбросами 1000 Гт (гигатонн) углекислого газа.

Последствия глобального потепления климата.

Исследования изменения климата и возможных его последствий стали в современном мире научными проблемами, которые необходимо решать на государственном уровне (Распоряжение Правительства РФ от 25 декабря 2019 г. № 3183-р Об утверждении национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 г.) [18].

Ниже приведены некоторые из ожидаемых последствий глобального изменения климата в США по данным четвертого Национального доклада по оценке климата [19]:

- Повышение уровня моря. Глобальный уровень моря поднялся примерно 0,2 метра с момента начала надежного ведения учета в 1880 году. К 2100 году ученые прогнозируют, что при сценарии с высоким уровнем выбросов (RCP 8.5) он поднимется как минимум еще на 0,3 метра, но, возможно, на высоту до 2 метров.

- Ураганы станут интенсивнее и более частыми. Прогнозируется, что интенсивность штормов, связанных с ураганами, и количество осадков будут увеличиваться по мере того, как температура будет повышаться.

- Больше засух и волн жары. Прогнозируется, что засухи и волны жары (периоды аномально жаркой погоды, продолжающиеся от дней до недель) станут более интенсивными, а волны холода – менее интенсивными и менее частыми.

- Более длительный сезон лесных пожаров. Потепление климата и длительная засуха повышают риск лесных пожаров.

- Изменения в характере осадков. Изменение климата оказывает неравномерное воздействие на количество осадков (дождь и снег), при этом в некоторых местах наблюдается увеличение количества осадков и наводнений, а в других наблюдается засуха.

- Сезон без заморозков (и сезон выращивания) удлинится, удлинится и вегетационный период, что повлияет на экосистемы и сельское хозяйство.

- Арктика, скорее всего, станет свободной от льда. Ожидается, что морской ледяной покров в Северном Ледовитом океане продолжит уменьшаться, и океан, скорее всего, станет практически свободным ото льда в конце лета, если текущие прогнозы сохранятся. Ожидается, что это изменение произойдет до середины века.

- Сокращение количества дней «благоприятной погоды».

- Увеличение кислотности океанических вод (кислотность растворяет коралловые рифы, угрожает рыболовству).

- Негативное влияние «волн жары» на здоровье людей.

Как можно заметить, прогнозы некоторых событий, зависящих от роста температуры, носят вероятностный характер с учетом допустимой достоверности в зависимости от реализации сценариев RCP МГЭИК [1], о которых говорилось выше.

Для огромной территории Российской Федерации с ее многочисленными климатическими зонами последствия ожидаемых изменений климата неоднозначны. К отрицательным последствиям ожидаемых изменений климата для Российской Федерации, изложенным в «Национальном плане мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года» [18], относятся:

- повышение риска для здоровья населения;

- рост повторяемости, интенсивности и продолжительности засух в одних регионах, экстремальных осадков, наводнений и опасного для сельского хозяйства переувлажнения почвы – в других;

- повышение пожароопасности в лесных массивах;

- деградация вечной мерзлоты в северных регионах с ущербом для строений и коммуникаций;

- нарушение экологического равновесия, в том числе вытеснение одних биологических видов другими;

- распространение инфекционных и паразитарных заболеваний;

- увеличение расхода электроэнергии на кондиционирование воздуха в теплый сезон.

К возможным положительным последствиям ожидаемых изменений климата для Российской Федерации относятся в том числе:

- сокращение расходов энергии в отопительный период;

- улучшение ледовой обстановки и, соответственно, условий транспортировки грузов в арктических морях, облегчение доступа к континентальному шельфу Российской Федерации в Северном Ледовитом океане;

- улучшение структуры и расширение зоны растениеводства, а также повышение эффективности животноводства (при выполнении ряда дополнительных условий и принятии определенных мер);

- повышение продуктивности бореальных лесов.

Необходимо отметить, что в различных частях Земли темпы роста температуры приземной атмосферы весьма различны [20]–[24]. С 1976 года скорость роста температур в Северном полушарии выше, чем в Южном полушарии, а на территории России выше (0,5°C/10 лет), чем в среднем по Северному полушарию и по земному шару в целом (0,18°C/10 лет) [25].

Изменение климатических показателей Кавказского региона (особенно температурного режима) по данным наших исследований [26]–[28], сопоставимо с их изменениями по территории России, о чем сказано ниже.

Изменение климатических характеристик Кавказского региона в современный период.

Для здравоохранения, производительности сельского хозяйства, безопасности водных ресурсов и региональных экосистем изучение региональных изменений климата является важнейшей составляющей проводимых в мире исследований. Полученные нами оценки изменения современного климата Кавказского региона передаются в Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля для ежегодного Доклада Росгидромета [http://climatechange.igce.ru/index.php]. В результате анализа временных рядов температуры, получено, что в 1976–2024 гг. скорость роста средней температуры на юге европейской части России во всех климатических зонах продолжала усиливаться. Во всех климатических зонах наблюдалось увеличение среднесезонных и среднегодовых температур на статистически значимом уровне (p=5%). Исключение пока составляет высокогорье (данные м/станции Терскол), где устойчивые положительные тренды средних температур имели место в летний сезон и в году.

С 1976 года рост среднегодовых температур горных станций остается значительным с высоким вкладом в суммарную дисперсию: в Ахты (горная зона) на 0,5°C/10 лет (D=55%) и в Теберде (горная зона) на 0,4°C/10 лет (D=45%) (Рис. 5). В Терсколе с 1976 года скорость роста среднегодовой температуры значительно усилилась до 0,21°C/10 лет (D=20 %) и достигла значимого уровня (Рис. 5). Максимальные скорости роста среднегодовой температуры (0,56°C/10 лет (D=60%) и 0,53°C/10 лет (D=58%) соответственно) имели место на предгорной м/станции Нальчик и степной м/станции Прохладная.

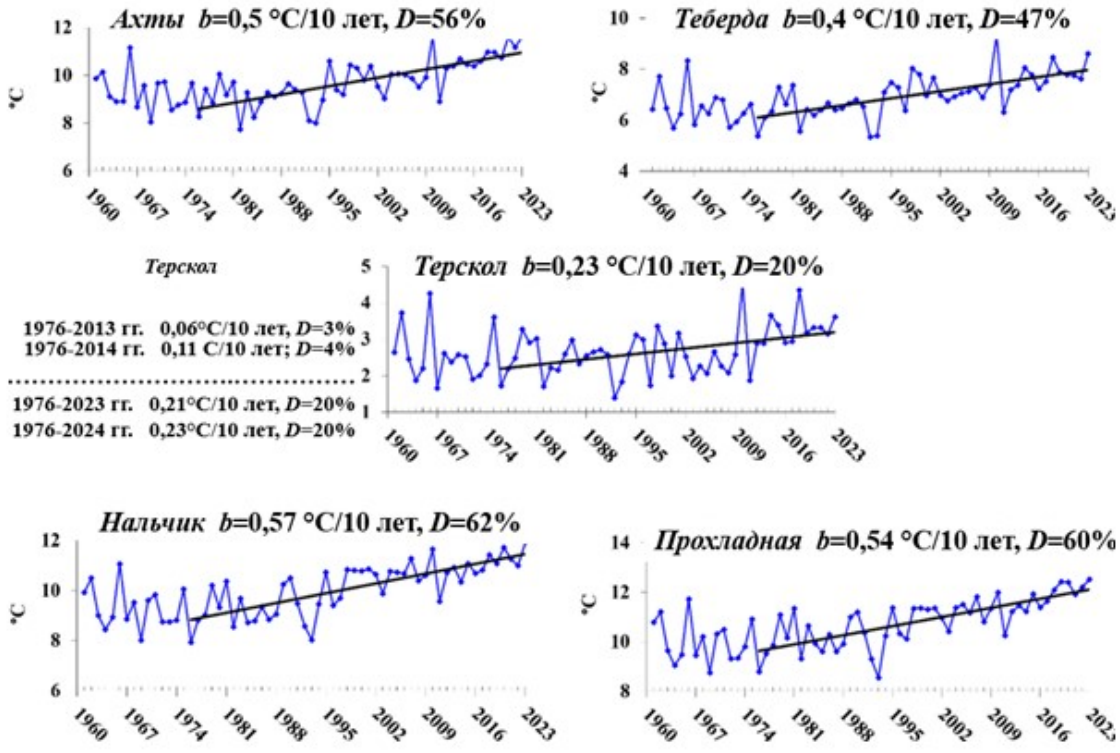

Рис. 5. Современные изменения температуры различных климатических зон Кавказского региона (1961–2024 гг.) с линейными трендами (1976–2024 гг.)

Fig. 5. Modern temperature changes in different climatic zones of the Caucasus region (1961–2024) with linear trends (1976–2024)

Надо отметить, что во всех климатических зонах, в том числе высокогорной зоне, наблюдается общая закономерность – рост средней температуры на значимом уровне в летний и осенний сезоны на фоне сокращения количества осадков. Если такие тенденции в динамике метеопарметров сохранятся, то степная и предгорная территории до середины нынешнего столетия окажутся в зоне средней и сильной засухи.

В Специальном отчете МГЭИК об океане и криосфере в условиях меняющегося климата (2019) [29] говорится, что местные темпы потепления зависят от сезона (высокая степень достоверности): в Европейских Альпах потепление более выражено летом и весной, также как на Кавказе, тогда как в Тибете потепление сильнее зимой. Поэтому изучение процессов деградации ледников на Кавказе, изменение водного баланса горных рек, имеющее особое значение как для деятельности людей в области сельского хозяйства, так и туристско-рекреационного комплекса, представляет особый интерес.

Проведя анализ температуры станции Терскол по двум подпериодам (1961–2000 гг. и 2001–2024 гг.), были получены характеристики изменения температурного режима в современный период (Рис. 6). К долговременной (60 лет) положительной тенденции сезонной и годовой температуры всех климатических зон за последние 25 лет добавился статистически значимый рост температуры в зимний (a=1,2°C/10 лет, D=19,7%) и весенний(a=0,62°C/10 лет, D=15,6%) сезоны, наряду с имеющимся в летний сезон (a=0,47°C/10 лет, D=19,4%) и в году целом (a=0,6°C/10 лет, D=34,9%) [30].

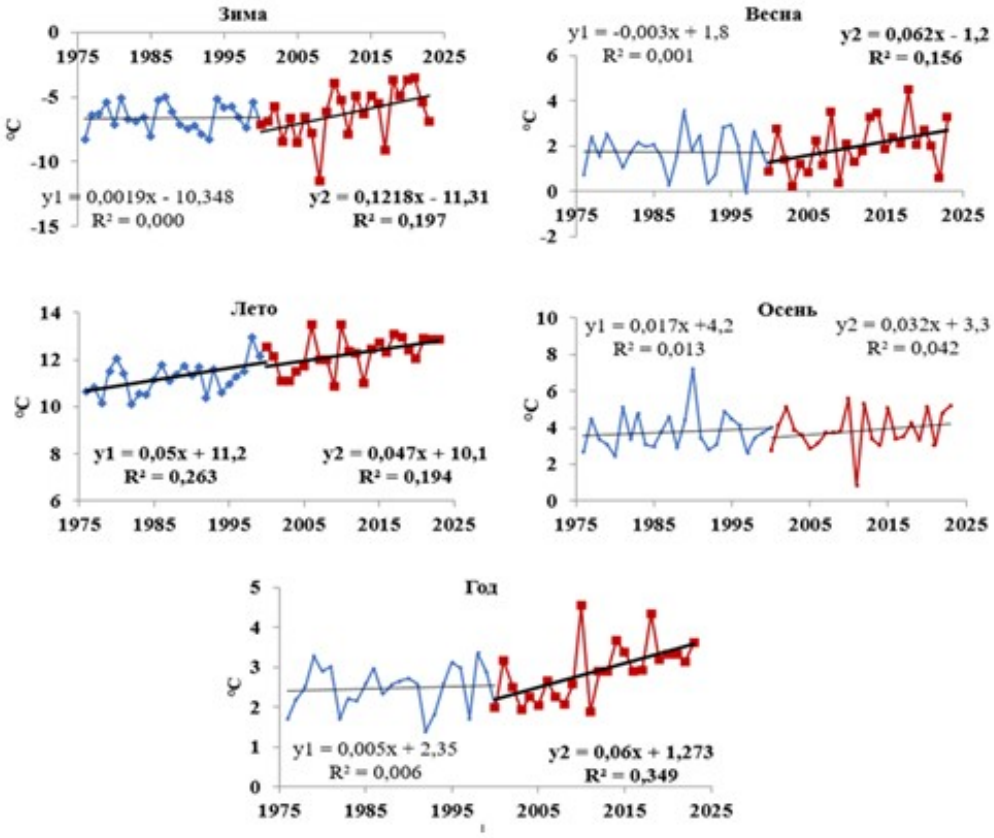

Рис. 6. Сезонные и годовые температуры Терскола с линейными трендами в 1976–2000 гг. и 2001–2024 гг.

Fig. 6. Seasonal and annual temperatures of Terskol with linear trends in 1976–2000 and 2001–2024.

Таким образом, можно сделать вывод, что деградация ледников Кавказа обусловлена вполне конкретными внешними причинами: рост летней температуры приземного воздуха на статистически значимом уровне за последние 60 лет в высокогорной зоне Кавказа, а также ускорение роста зимней и весенней температуры на статистически значимом уровне за последние десятилетия (2001–2024 гг.) на фоне снижения количества зимних осадков и уменьшения альбедо снега.

Поскольку талая вода ледников и снега является основным источником воды для нескольких рек, сокращение этого источника является бедствием для значительной части людей, живущих в близлежащих регионах.. Понимание того, что происходит с ледниками, нужно для того, чтобы спрогнозировать изменения водного баланса территорий.

Для оценки водного баланса при таянии ледников Центрального Кавказа, обусловленных влиянием современных изменений климата высокогорья (рост летней температуры, уменьшение зимних осадков), были использованы данные из работ [30], [31] по долинным ледникам бассейна реки Баксан (табл. 1). Используя данные сокращения площади ледников, был проведен расчет среднего, минимального и максимального значений изменения водного баланса (тонн воды) в результате таяния ледников Баксанского ущелья за последние 60 лет.

В результате проведенных расчетов, опубликованных в [32], получено, что в сумме за последние 60 лет долинные ледники бассейна р. Баксан потеряли 844,51 млн. тонн воды (Табл. 1). Из таблицы 1 видно, что 476,25 млн. тонн воды пришлось на ледник Большой Азау. Таким образом, за последние 20 лет ледник Большой Азау потерял 260 млн. тонн воды, что составило более половины потерь за третью часть времени от всего исследованного периода. Такое же ускоренное таяние за последние двадцать лет имело место и для других ледников.

Таблица 1. Снижение водного запаса в результате таяния ледников в бассейне р. Баксан
Table 1. Decrease in water reserves due to melting glaciers in the Baksan River basin

№	**Название ледника**	**Снижение запаса воды, млн. тонн**		
		среднее	максимум	минимум
1	2	3	4	5
с 1957 по 2020 гг.				
1	Большой Азау	476,25	491,25	461,25
2	Ирик	59,25	63,00	55,50
3	Чегеткарачиран	2,26	2,40	2,10
4	Юсеньги	16,50	18,00	15,00
5	Шхельда (с 1960 по 2020 гг.)	93,00	96,00	90,00
6	Башкара	27,75	29,25	26,25
7	Юномсу	33,00	34,50	31,50
8	Большой Тютю (с 1962 по 2020 гг.)	44,25	47,25	41,25
9	Каяартыбаши	92,25	98,25	86,25
	Сумма	844,51	879,9	809,1
с 1997 по 2017 гг.				
10	Большой Азау	260	380	140
11	Терскол	80	130	30

Таким образом, за последние 60 лет во всех климатических зонах Кавказской территории (равнинной, предгорной, горной и высокогорной) наблюдается ярко выраженная и статистически значимая тенденция потепления, а именно, во все сезоны и в году в целом в равнинной, предгорной и горной климатических зонах и в летние сезоны в высокогорной зоне. Результаты исследования за последние 20 лет показали, что рост средней зимней и весенней температуры на м/станции Терскол (высокогорье) усилился до статистически значимого, догнав по скорости роста температуры в остальных климатических зонах. Сложившийся термический режим и режим осадков в последние десятилетия явился основной составляющей из многих факторов, приводящих к сокращению площади ледников и изменению водного баланса.

В заключении хочется остановиться на перспективах состояния ледников, которые с определенной вероятностью приводятся в Специальном отчете МГЭИК об океане и криосфере в условиях меняющегося климата [29]. Показано, что по результатам моделирования глобального горного оледенения на основе результатов сценариев МГЭИК в случае реализации относительно мягкого сценария RCP 2.6 к 2100 г. объем оледенения Кавказа уменьшится по сравнению с базовым периодом (1950–1980) на 60–80 %, а в случае реализации жесткого сценария RCP 8.5 оледенение Кавказа прекратит свое существование.

Все выявленные изменения основных климатических характеристик Кавказского региона могут создать условия, приводящие к ускоренному сокращению ледников Кавказа. Поэтому, необходимо продолжение наблюдений за изменением климата и за последствиями этих изменений для разработки мер адаптации и защиты.

Список использованных источников

1. МГЭИК: Изменение климата: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / основ. ред.: Р. К. Пачаури, Л. А. Мейер и др. Женева: МГЭИК, 2014. 163 с.
2. Климатическая доктрина Российской Федерации от 17.12.2009 № 861-рп // Официальный сайт Президента РФ. URL: http://www.kremlin.ru/acts/6365 (дата обращения: 10.07.2025)
3. Глоссарий терминов / МГЭИК — Специальный доклад Рабочей группы III МГЭИК / ред.: Б. Метц, О. Р. Дэвидсон и др. Кембридж: Изд-во Кембридж. ун-та, 2001. 466 с.
4. *Westerhold, T., et al.* Evidence for astronomically forced climate variability over the past 66 million years. Science, 369(6509), 1383–1387 (2020). (In English)
5. Register of events on the Federation Council website. URL: http://council.gov.ru/activity/meetings/88088/agenda (Accessed: 10.07.2025)
6. *Вакуленко Н. В., Котляков В. М., Парренин Ф., Сонечкин Д. М.* Исследование разномасштабных взаимосвязей между изменениями приземной температуры воздуха и концентрации CO_2 в атмосфере // Лед и снег. Москва: Наука, 2016. Т. 56, № 4. С. 533–542.
7. *Кислов А. В.* Климат в прошлом, настоящем и будущем / М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 351 с.
8. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата / М.: ГОНТИ-НКТП, 1939. 247 с.
9. *Santer B. D., et al.* Celebrating the Anniversary of Three Key Events in Climate Change Science // Nature Climate Change. 2019. No. 9. Pp. 180–182. (In English)
10. *Монин А. С., Шишков Ю. А.* История климата / Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 407 с.
11. Антропогенные изменения климата / Под ред. М. И. Будыко и Ю. А. Израэля. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 405 с.

12. *Мохов И. И., Демченко П. Ф., Елисеев А. В., Хон В. Ч., Хворостьянов Д. В.* Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX–XXI веках на основе модели ИФА РАН с учётом антропогенных воздействий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 5. С. 629–642.
13. *Денисов С. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И.* Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO_2 и CH_4 в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Доклады Академии наук, 2019. Т. 488, № 1. С. 74–80.
14. *Куричева О. А., Авилов В. К., Варлагин А. В., Гитарский М. Л., Дмитриченко А. А. и др.* Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RuFlux // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. № 87(4). С. 512–535.
15. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования / Под ред. академика РАН И. И. Мохова, члена-корреспондента РАН А. А. Макоско, к.ф.-м.н. А. В. Чернокульского. М.: РАН, 2024. 360 с.
16. https://scientificrussia.ru/ (дата обращения: 11.07.2025)
17. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / N.-O. Portner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegrfa, M. Craig, S. Langsdorf, S. Loschke, V. Moller, A. Okem, B. Rama (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p.
18. Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года // Consultant.ru. URL: https://document/cons_doc_LAW_342408/ (дата обращения: 10.07.2025).
19. *Венер М. Ф., Арнольд Дж. Р., Кнутсон Т., Кункель К. Э., Легранд А. Н. (ред.)* Засухи, наводнения и лесные пожары (доклад). В: Специальный доклад по климатологии: Четвёртая национальная оценка климата. Том 1. Вашингтон: Программа исследований глобальных изменений США, 2017. С. 231–256. DOI: https://doi.org/10.7930/J0CJ8BNN
20. *Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В.* Климатические изменения температуры воздуха на территории России по данным инструментальных наблюдений // Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России». 2007, № 3. С. 41–48.
21. *Вакуленко Н. В., Котляков В. М., Сонечкин Д. М.* Предсказуем ли климат в геологическом масштабе времени? // Доклады Академии наук. Серия «Физика атмосферы и океана». 2015. Т. 460. С. 215.
22. *Мохов И. И.* Российские климатические исследования в 2011–2014 гг. // Известия Российской академии наук. Серия «Физика атмосферы и океана». 2017. Т. 53, № 5. С. 624–640.
23. *Гулёв С. К., Катцов В. М., Соломина О. Н.* Глобальное потепление продолжается. Наука: МАИК «Наука/Интерпериодика» (М.). 2008. Т. 78, № 1. С. 20–27.
24. *Катцов В. М., Семенов С. М.* Климат Земли: факторы изменения и причины обеспокоенности // В сб. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Москва, 2014. С. 10–17.
25. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва, 2025. 135 с.
26. *Tashilova A. A., Ashabokov B. A., Kesheva L. A., Teunova N. V.* Analysis of climate change in the Caucasus region: the end of the 20th – the beginning of the 21st century // CLIMATE. 2019. Vol. 7, No. 11. Pp. 1–15. DOI: https://doi.org/10.3390/cli7010011 (In English)
27. *Федченко Л. М., Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В.* Изменение основных климатических показателей в предгорной зоне Северного Кавказа за период 1961–2022 гг. // Географический вестник. 2024. № 1(68). С. 113–123.

28. *Ашабоков Б. А., Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В.* Динамика температур на европейской территории с 1500 по 2004 гг. и анализ их аномалий в современный период // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 3. С. 123–148.
29. IPCC 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / H.-O. Pörtner, D. S. Roberts, W. Masson-Delmotte, P. Zay, M. Tignor, E. Polochanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weier (ed.)
30. *Беккиев М. Ю., Докукин М. Д., Калов Р. Х., Ташилова А. А.* Современная деградация долинных ледников Центрального Кавказа // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 8, № 3. С. 113–141.
31. *Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D.* Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017 // Frontiers in Earth Science. 2019. Vol. 7, Article 153. (In English)
32. *Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В.* Уменьшение водных ресурсов региона как следствие деградации ледников Северного Кавказа под воздействием климатических изменений. Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 1(127). С. 1–5.

Поступила 28.10.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 24.11.2025.

Об авторе:

Ташилова Алла Амарбиевна, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела физики облаков ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (360030, Россия, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, пр. Ленина, 2), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2368-6047, tashilovaa@mail.ru

References

1. IPCC: Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds.: R. K. Pachauri, L. A. Meyer, et al. Geneva: IPCC, 2014. 163 p.
2. Climate Doctrine of the Russian Federation of 17.12.2009 No. 861-rp // Official website of the President of the Russian Federation. URL: http://www.kremlin.ru/acts/6365 (Accessed: 10.07.2025)
3. Glossary of Terms / IPCC — Special Report of IPCC Working Group III / eds.: B. Metz, O. R. Davidson, et al. Cambridge: Cambridge University Press. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 466 p.
4. *Westerhold T., et al.* Evidence for astronomically forced climate variability over the past 66 million years. Science, 369(6509), 1383–1387 (2020).
5. Register of events on the Federation Council website. URL: http://council.gov.ru/activity/meetings/88088/agenda (Accessed: 10.07.2025)
6. *Vakulenko N. V., Kotlyakov V. M., Parrenin F., Sonechkin D. M.* A Study of Multiscale Relationships between Changes in Surface Air Temperature and Atmospheric CO_2 Concentration // Ice and Snow. Moscow: Nauka. 2016. Vol. 56, No. 4. Pp. 533–542. (In Russian)
7. Kislov A. V. Climate in the Past, Present, and Future // Moscow: MAIK Nauka/Interperiodika, 2001. 351 p.
8. *Milankovitch M.* Mathematical Climatology and Astronomical Theory of Climate Oscillations / Moscow: GONTI-NKTP, 1939. 247 p.
9. *Santer, B. D., et al.* Celebrating the Anniversary of Three Key Events in Climate Change Science // Nature Climate Change. 2019. No. 9. Pp. 180–182.
10. *Monin A. S., Shishkov Yu. A.* History of Climate / Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 407 p.

11. Anthropogenic Climate Change / Ed. by M. I. Budyko and Yu. A. Izrael. L.: Gidrometeoizdat, 1987. 405 p.
12. *Mokhov I. I., Demchenko P. F., Eliseev A. V., Khon V. Ch., Khvorostyanov D. V.* Estimates of global and regional climate changes in the 19th–21st centuries based on the IAP RAS model, taking into account anthropogenic impacts // Izvestiya RAN. Physics of the Atmosphere and Ocean. 2002. Vol. 38, No. 5. Pp. 629–642. (In Russian)
13. *Denisov S. N., Eliseev A. V., Mokhov I. I.* Contribution of natural and anthropogenic CO_2 and CH_4 emissions into the atmosphere from the territory of Russia to global climate change in the 21st century // Reports of the Academy of Sciences. 2019. Vol. 488, No. 1. Pp. 74–80. (In Russian)
14. *Kuricheva O. A., Avilov V. K., Varlagin A. V., Gitarsky M. L., Dmitrichenko A. A. et al.* Monitoring of ecosystem fluxes of greenhouse gases in Russia: the RuFlux network // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series. 2023. No. 87(4). Pp. 512–535. (In Russian)
15. Climate Change: Causes, Risks, Consequences, Adaptation and Regulation Challenges / Edited by Academician of the Russian Academy of Sciences I. I. Mokhov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences A. A. Makosko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences A. V. Chernokul'skii. Moscow: RAS, 2024. 360 p.
16. https://scientificrussia.ru/ (Accessed: 11.07.2025)
17. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / N.-O. Portner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegrfa, M. Craig, S. Langsdorf, S. Loschke, V. Moller, A. Okem, B. Rama (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p.
18. National Action Plan for the First Stage of Adaptation to Climate Change through 2022 // Consultant.ru. URL: https://document/cons_doc_LAW_342408/ (Accessed: 10.07.2025)
19. *Wehner M. F., Arnold J. R., Knutson T., Kunkel K. E., Legrand A. N. (eds.)* Droughts, Floods, and Wildfires (Report). In: Special Report on Climatology: Fourth National Climate Assessment. Vol. 1. Washington: U.S. Global Change Research Program, 2017. Pp. 231–256. DOI: https://doi.org/10.7930/J0CJ8BNN (In Russian)
20. *Gruza G. V., Rankova E. Ya., Rocheva E. V.* Climatic Changes in Air Temperature in Russia Based on Instrumental Observations // Bulletin "Use and Protection of Natural Resources in Russia". 2007. No. 3. Pp. 41–48. (In Russian)
21. *Vakulenko N. V., Kotlyakov V. M., Sonechkin D. M.* Is Climate Predictable on a Geological Time Scale? // Reports of the Academy of Sciences. Series "Physics of the Atmosphere and Ocean". 2015. Vol. 460. Pp. 215. (In Russian)
22. *Mokhov I. I.* Russian Climate Research in 2011–2014 // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Series "Atmospheric and Oceanic Physics". 2017. Vol. 53, No. 5. Pp. 624–640. (In Russian)
23. *Gulev S. K., Kattsov V. M., Solomina O. N.* Global Warming Continues. Science: MAIK "Science/Interperiodica"(Moscow). 2008. Vol. 78, No. 1. Pp. 20–27. (In Russian)
24. *Kattsov V. M. Semenov S. M.* Earth's Climate: Drivers of Change and Causes of Concern // In the collection. Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation. Moscow. 2014. Pp. 10–17.(In Russian)
25. Report on Climate Features in the Russian Federation for 2024. Moscow, 2025. 135 p.
26. *Tashilova A. A., Ashabokov B. A., Kesheva L. A.,Teunova N. V.* Analysis of Climate Change in the Caucasus Region: the End of the 20th – the Beginning of the 21st Century // CLIMATE. 2019. Vol. 7, No. 11. Pp. 1–15. Doi: https://doi.org/10.3390/cli7010011
27. *Fedchenko L. M., Tashilova A. A., Kesheva L. A., Teunova N. V.* Changes in the main climatic indicators in the foothill zone of the North Caucasus for the period 1961–2022 // Geographical Bulletin. 2024. No. 1(68). Pp. 113–123. (In Russian)

28. *Ashabokov B. A., Tashilova A. A., Kesheva L. A., Teunova N. V̇.* Temperature dynamics in the European territory from 1500 to 2004 and analysis of their anomalies in the modern period // Science. Innovations. Technologies. 2025. No. 3. Pp. 123–148. (In Russian)
29. IPCC 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / H.-O. Pörtner, D. S. Roberts, W. Masson-Delmotte, P. Zay, M. Tignor, E. Polochanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weier (ed.)
30. *Bekkiev M. Yu., Dokukin M. D., Kalov R. Kh., Tashilova A. A.* Current degradation of valley glaciers in the Central Caucasus // Fundamental and Applied Climatology. 2021. Vol. 8, No. 3. Pp. 113–141.
31. *Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D.* Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017 // Frontiers in Earth Science. 2019. Vol. 7, Article 153.
32. *Tashilova A. A., Kesheva L. A., Teunova N. V.* Decrease in Regional Water Resources as a Result of Glacier Degradation in the North Caucasus Under the Impact of Climate Change. International Research Journal. 2023. No. 1(127). Pp. 1–5. (In Russian)

Submitted 28.10.2025; approved after reviewing 17.11.2025; accepted for publication 24.11.2025.

About the author:

Tashilova Alla Amarbievna, doctor of physical and mathematical sciences, associate professor, Leading Researcher, Cloud Physics Department, High Mountain Geophysical Institute (360030, Russia, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Lenina str., 2), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2368-6047, tashilovaa@mail.ru