

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ
SCIENTIFIC DISCUSSIONS

УДК 551 583

DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.381

ПЕРИОДЫ ДОМИНИРОВАНИЯ
ВЛИЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ И
АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ
НА КЛИМАТ

В.Ф. Логинов, Ю.А. Бровка

*Институт природопользования Национальной
академии наук Беларуси, г. Минск, Республика
Беларусь
brovka.yuliya@mail.ru*PERIODS OF DOMINATION OF
THE INFLUENCE OF NATURAL
AND ANTHROPOGENIC FACTORS
ON CLIMATE

Vladimir F. Loginov, Yuliya A. Brovka

*Institute for Nature Management of the National
Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of
Belarus
brovka.yuliya@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрена роль естественных и антропогенных факторов в формировании изменений климата за период инструментальных наблюдений (период с 1881 по 2022 год). Показано, что за последние 130 лет приток прямой солнечной радиации на подстилающую поверхность испытывал значительные изменения в результате многолетних изменений содержания в атмосфере вулканического и антропогенного аэрозоля. Антропогенный аэрозоль обладает несколько другими физическими свойствами и временной динамикой, по сравнению с вулканическим аэрозолем. Слабый рост содержания аэрозоля антропогенного происхождения в первой половине XX столетия сменился его быстрым ростом с 1960-х годов до середины 1970-х годов; затем наступила кратковременная пауза, после которой наблюдалось очищение атмосферы от антропогенного аэрозоля с середины 1990-х годов до настоящего времени. Изменения накопленных сумм отклонений прямой солнечной радиации от нормы согласуются с изменением климата и ледовитости арктических морей за период с 1900 по 1970 год. Снижение ледовитости в период с 1920 по 1950 год было сравнимым с изменением ледовитости с 1980-х годов до начала текущего столетия. Очищение атмосферы от вулканического аэрозоля в период с 1920-х до середины 1940-х годов является главной

Abstract. The role of natural and anthropogenic factors in the formation of climate change over the period of instrumental observations (1881–2022) is considered. It is shown that over the past 130 years, the influx of direct solar radiation to the underlying surface has experienced significant changes as a result of long-term changes in the content of volcanic and anthropogenic aerosol in the atmosphere. Changes in the accumulated sums of deviations of direct solar radiation from the norm are consistent with changes in climate and ice coverage of the Arctic seas over the period from 1900 to 1970. Reduction of ice coverage in the period from 1920 to 1950 was comparable to the change in ice coverage from the 1980s to the beginning of the current century. The cleansing of the atmosphere from volcanic aerosol in the period from the 1920s to the mid-1940s is the main reason for the warming and low ice coverage of the Arctic seas. The accumulation and release of heat by the World Ocean in these years probably modulated climate change during this period.

The issue of drawing a dividing line between periods of dominance of natural and anthropogenic factors in climate change over the past 130 years is discussed. It is concluded that the dominance of anthropogenic factors in climate change has come only in the last 35–40 years. Until the mid-1940s, natural factors dominated climate change. The 1950s–1970s can be taken as transitional.

причиной потепления и низкой ледовитости арктических морей. Накопление и отдача тепла Мировым океаном в указанные годы, вероятно, модулировало изменение климата в этот период. Обсуждается вопрос проведения разделительной линии периодов доминирования естественных и антропогенных факторов в изменении климата последних 130 лет. Сделан вывод, что доминирование антропогенных факторов в изменении климата наступило только в последние 35–40 лет. До середины 1940-х годов в изменении климата доминировали естественные факторы. Период с 1950-х по 1970-е годы можно принять как переходные.

Ключевые слова: естественные и антропогенные факторы; паузы; изменение температуры; аэрозоли; оптическая толщина аэрозолей; солнечная активность; актинометрические наблюдения.

Введение

Предметом острых дискуссий до настоящего времени остается вопрос положения разделительных линий периодов доминирования влияния естественных и антропогенных факторов на изменения современного климата. Совершенно очевидно, что в доиндустриальную эру изменения климата определяли естественные факторы. В последние два столетия, по мнению подавляющего числа исследователей, доминирующая роль начинает переходить или уже перешла к антропогенным факторам изменения климата. Разделительные линии времени перехода и степени доминирования воздействий естественных и антропогенных факторов на климат, иногда перемещаются в том числе и в зависимости от научных пристрастий групп ученых. Главной причиной имеющихся неопределенностей в оценке положения разделительных линий периодов доминирования естественных и антропогенных факторов в изменении климата является недостаточность знаний о процессах в климатической системе и неполнотой используемых баз данных о климате Земного шара.

Keywords: natural and anthropogenic factors; pauses; temperature change; aerosols; optical thickness of aerosols; solar Activity; actinometric observations.

В пятом отчете (2013 год) эксперты Международной группы экспертов по изменению климата (далее – МГЭИК) сделали следующий вывод: «... в высшей степени вероятно (extremely likely, 95–100%), что влияние человека является доминирующей причиной наблюдаемого потепления с середины XX столетия» [IPCC, 2013]. Подобные выводы можно встретить и в ряде других работ [Lean, Rind, 2008]: «... более 90% наблюдаемого с 1900 года потепления и практически 100% наблюдаемого с 1970 года потепления имели антропогенную природу». В последние годы появились более умеренные оценки роли антропогенных факторов в изменении современного климата. Так, в работе [Haustein et al., 2017] антропогенным факторам отводится более 70% наблюдаемого роста глобальной температуры в последние 170 лет. В числе естественных факторов в этой статье называют вулканический аэрозоль и солнечную активность. Оценивается также роль естественной изменчивости гидрометеорологических характеристик.

В самое последнее время опубликована наиболее обстоятельная статья [Семенов, Латиф, 2022], где представлены результаты с изложением

несколько другой позиции, которая проливает свет на положение разделительной линии эпох доминирования естественных и антропогенных факторов.

Авторы показали, что потепление середины XX века сопровождалось значительной отрицательной аномалией площади льда в Арктике, сравнимой с современной, что указывает на значительный вклад естественной изменчивости в современные климатические изменения. Наши данные свидетельствуют, что в период с 1930-х по середину 1940-х годов наблюдалось значительное увеличение прозрачности атмосферы, усиление притока солнечной радиации в теплое время года и, как следствие, знаменитое потепление Арктики, которое никак не было связано с ростом парниковых газов антропогенного происхождения [Логинов, 2012; Логинов, 2021]. В работе [Семенов, Латиф, 2022] также указано, что потепление последних трех десятилетий XX–XXI века хорошо воспроизводится в ансамблевых экспериментах с моделями общей циркуляции атмосферы (далее – МОЦА) с использованием данных Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature (далее – HadISST1.1), в то время как потепление середины XX века в высоких широтах не было воспроизведено. Авторы справедливо предполагают значительный вклад естественных факторов в долгопериодные колебания климата как в середине XX века, так и в современное потепление. Таким образом, авторы указанной работы смещают разделительную линию эпох доминирования естественных и антропогенных факторов изменения климата на период с 1970-х по 1980-е годы. Добавим к этому, что эксперименты с МОЦА с использованием предписанных согласно данным наблюдений за температурой поверхности океана (далее – ТПО) и границ морского льда в XX веке показали, что изменение граничных условий практически полностью объясняют климатические изменения над континентами в целом. Изменение глобального поля ТПО объясняет не только средние значения

температуры, но и региональные особенности гидрологического цикла.

Таким образом, важное значение при моделировании климата является корректное задание граничных условий. Использование в МОЦА завышенных величин ледовитости и площади снежного покрова в Северном полушарии (HadISST1.1), то есть некорректное задание нижнего граничного условия, не только не позволило воспроизвести при моделировании потепление Арктики в период с 1920-х до середины 1940-х годов, но преднамеренно или непреднамеренно привело авторов к выводу о незначительной роли известных естественных климатообразующих факторов и повышению роли антропогенных факторов в изменении климата. Это в конечном счете добавило уверенности авторам парниковой теории при формулировании вывода о доминировании антропогенных факторов в изменении современного климата. Нечто подобное может произойти и, вероятно, происходит в случаях использования неполных или неоднородных баз данных, как это произошло в случае завышения ледовитости Арктики в период с 1920-х по 1950-е годы. Этот вопрос будет рассмотрен отдельно.

Некоторые небольшие расхождения в результатах таких модельных экспериментов и данных наблюдений могут быть объяснены прямым радиационным воздействием ряда других факторов, например, таких как: аэрозоли естественного и антропогенного происхождения, вариации излучения, приходящего от Солнца при изменении его яркости (солнечной постоянной) либо другие внешние или внутренние факторы, включая космические. Определенная аргументация на этот счет представлена в многочисленных работах [Максимов, 1970; Герман, Гольберг, 1981; Сазонов, 1991; Монин, 2000; Кондратьев, 2004; Pan-Eurasian Experiment..., 2005; Кондратьев, 2006; Кривошукский, Репнев, 2009; Переведенцев, 2009; Scafetta, 2012; Федоров, 2018; Логинов, Лысенко, 2019].

Оценки изменения светимости солнечного диска (солнечной постоянной) выполнены нами

еще в 1972 году [Логинов, 1972]. Оказалось, что максимальные значения светимости солнечного диска пришлось на тринадцатый (период с 1890 по 1910 год), семнадцатый (период с 1933 по 1943 год) и двадцать первый (период с 1976 по 1985 год) 11-летний цикл по Цюрихской нумерации [Логинов, 2012].

Максимальные значения яркости солнечного диска отмечены в 1982, периоды с 1937 по 1939 и с 1979 по 1980 год, когда наблюдались непропорционально большие площади светлых образований на Солнце (факелов), а число темных образований (пятен) было близко к норме. Если принять для этих периодов максимальные значения величин светимости солнечного диска, то для указанных лет через 43–44 года было характерно дополнительное радиационное воздействие. По разным оценкам оно составляло до 0,1% от солнечной постоянной. Это означает, что радиационное воздействие, связанное с изменением светимости солнечного диска, составляло несколько десятых Вт/м². В отчетах МГЭИК фигурировали оценки изменения солнечной постоянной от 0,1 до 0,25 Вт/м².

Таким образом, в годы максимумов указанных 11-летних циклов могло возникнуть связанное со светимостью солнечного диска дополнительное радиационное воздействие на климат около нескольких десятых Вт/м². В другие максимумы 11-летних циклов эти оценки могут быть еще ниже.

В отдельных работах принимается важная роль водяного пара и влагосодержания атмосферы, как независимый климатообразующий фактор [Малинин, 1994; Gregory, 2013; Малинин, Гордеева, Наумов, 2018], в противовес официальной точки зрения МГЭИК: «... концентрация водяного пара в атмосфере является ключевым следствием, а не причиной глобального потепления...» [IPCC, 2007]. В работе [Schmidt et al., 2010] вклад водяного пара в парниковый эффект оценивается в 50%, облачности – в 25%, а вклад CO₂ – только в 20%. Подобные точки зрения на природу современного климата принимаются МГЭИК как маргинальные.

Напомним ряд аргументов, которые приводились в различные годы последнего 50-летнего периода в ряде статей, где ставилась под сомнение доминирующая роль антропогенных факторов в изменении климата [Витинский, Оль, Сазонов, 1976; Мак-Кормак, Селига, 1982; Малинин, 1994; Folland et al., 1998; Даценко и др., 2004; Возможности предотвращения..., 2006; Шерстюков, 2008; Абдусаматов, 2009; Покровский, 2010; Моханакумар, 2011; Kirkby et al., 2011; Gregory, 2013; Сидоренков, 2015; Малинин, Гордеева, Наумов, 2018; Wang et al., 2019; Логинов, 2021]. Особую позицию в этой дискуссии занимали геологи, астрономы и историки, которые справедливо утверждали, что климат изменялся и до появления человека, причем более значительно, чем сейчас. В истории цивилизации существовали более теплые периоды, чем сейчас: период расцвета минойской культуры, расцвета Римской империи, Средневековье. Антропогенная деятельность в эти периоды была минимальной. В отдельные периоды, например в годы малого ледникового периода (с 1645 по 1815 год), было холоднее, чем сейчас. Более полно вопрос изменения климата в геологические, исторические и современные эпохи рассмотрен в многочисленных монографических и обзорных работах [Синицин, 1967; Монин, 1979; Будыко, 1984].

Как указывалось выше, влияние человека признается экспертами МГЭИК доминирующей причиной наблюдаемого потепления климата с середины XX века. С этим выводом, но с некоторыми замечаниями, можно согласиться, если рассматривать только вторую часть исследуемого ряда температуры Земного шара (период с 1977 по 2022 год). Известно, что в этот период наблюдался самый быстрый рост температуры Земного шара: рост температуры наблюдался как в Северном, так и в Южном полушариях, хотя и с несколько разными скоростями.

В изменении скорости роста температуры в Северном полушарии наблюдалась особенность, которая была определена в многочисленных работах как пауза в изменении зимней

температуры в период с 1998 по 2013 год. Эта пауза выразилась в уменьшении скорости роста температуры в зимние месяцы года приблизительно в 1,5 раза. Объяснить наличие такой паузы в изменении температуры, особенно в зимнее время, в период высокой концентрации парниковых газов и наибольшей скорости роста их концентрации в атмосфере, когда эффективны положительные альбедные связи, формирующие повышенную гравитационную устойчивость атмосферы, инверсионное распределение температуры и ослабление вертикальной конвекции, не представлялось возможным. В наших работах [Логинов, Лысенко, 2019; Логинов, 2021] была проведена численная оценка влияния уменьшившихся в годы паузы влажности атмосферы и оптической толщины облачности (далее – COT) по данным MODIS¹ (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на температуру зимнего и летнего сезонов. Результаты численного моделирования позволили установить, что изменения влажности атмосферы и COT обеспечили наблюдаемое уменьшение скорости роста температуры зимой и наблюдавшийся с увеличивающейся скоростью непрерывный рост температуры летом [Логинов, Лысенко, 2019].

В рамках теории парникового потепления климата невозможно объяснить падение температуры в период времени со второй половины 1940-х до второй половины 1970-х годов, которое было особенно выражено в Северном полушарии, а также более высокую скорость роста температуры в теплое время года по сравнению со скоростью роста температуры в холодное время года в последние 20–25 лет. Исходя из теории парникового потепления климата невозможно понять и наблюдавшееся в период времени со второго десятилетия XX века до середины 1940-х годов потепление климата в Северном полушарии, которое вошло в историю как потепление Арктики. В этот период отмечалось сильное уменьшение ледовитости Арктических морей и суда за одну навигацию могли проходить Северный Морской Путь.

Эти результаты свидетельствуют о том, что только для последних 35–40 лет антропогенная деятельность с определенными оговорками является доминирующим фактором изменения климата. Как указывалось ранее в отдельных работах, антропогенные факторы на 70% определяют современное изменение климата [Haustein et al., 2017], а существующие модели общей циркуляции атмосферы и океана, где доминирующим климатообразующим фактором являются парниковые газы, не могут объяснить потепление Арктики, наблюдавшееся в период с 1920-х по 1940-е годы. Доминирующим фактором тогда были естественные климатообразующие факторы [Логинов, 2012; Семенов, Латиф, 2022].

При выявлении причинности изменений климата надо также иметь в виду и ряд других обстоятельств, которые часто обсуждались в литературе и хорошо известны всем, кто занимается оценками роли внешних и внутренних факторов в изменении климата.

В силу неполноты наших знаний о физических процессах в климатической системе уверенный вывод группы экспертов МГЭИК об антропогенной причинности может встретить ряд возражений:

- оценки глобального и регионального воздействия радиационно-активных факторов от доиндустриальной эры до настоящего времени имеют значительный разброс, что обеспечит разброс оценок климата будущего;

- разработанные сценарии содержания антропогенных парниковых газов в атмосфере в силу неопределенностей в развитии мировой экономики являются предметом острых дискуссий;

- дискуссионными до настоящего времени остаются оценки роли малых климатообразующих факторов изменения климата и в особенности космических факторов:

- неопределенной остается роль долгопериодных приливов в изменении термодинамических свойств Мирового океана и изменений климата;

- оценки эффективности ряда обратных связей в климатической системе известны с

¹ MODIS Web [Электронный ресурс]. URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>.

точностью до фактора. Соотношение вклада главного механизма обратных связей через посредство изменения содержания и распределения водяного пара и вклада других механизмов обратных связей (альbedo подстилающей поверхности, высоты и количества облаков, вертикальной градиенты температуры) известны с недостаточной точностью. Имеются также основания полагать, что ряд обратных связей является зависимым;

- время, в течение которого достигается стационарное состояние атмосферы, оценивается различными моделями от 8 до 100 лет. Такой разброс в установлении стационарного состояния климатической системы говорит о некоторой неопределенности оценок чувствительности климатических моделей. Последняя определяет реакцию атмосферы на радиационное воздействие, определяемое изменением концентрации парниковых газов и других климатообразующих факторов;

- достоинства и недостатки моделей различной сложности широко известны и неоднократно обсуждались в литературе [Кондратьев, 2004; IPCC, 2013; Lewandowsky et al., 2018; Семенов, Латиф, 2022]. По крайней мере ряд из них не может быть устранен и в ближайшем будущем, например низкая точность параметризации ряда процессов в климатической системе. Это обуславливает существенный разброс прогностических оценок различных гидрометеорологических характеристик (температура, осадки, скорость ветра, влажность и так далее). Применение ансамблевого метода только незначительно улучшило ситуацию;

- проблемы климатических данных (полнота, однородность рядов, неопределенности при ассимиляции данных, полученных с различных платформ: наземной, аэрологической, спутниковой и так далее).

Используемые ряды гидрологических параметров далеко не всегда являются однородными, поскольку степень покрытия Земного шара данными наблюдений за последние 100–150 лет сильно различаются. Причиной тому являются многочисленные войны, революции, социально-экономические потрясения.

Последнее значительное уменьшение плотности мировой гидрометеорологической сети произошло в 1980-е годы. Сокращение числа гидрометеорологических станций в отдельных регионах Земного шара доходило до 50–60%. Восстановление сети в последние десятилетия идет очень медленно. Сокращение сети происходило в первую очередь в труднодоступных районах. В этой связи соотношение числа городских станций и станций в труднодоступных районах и сельской местности возрастало, а следовательно «урбанизационная» поправка в совокупных рядах гидрометеорологических характеристик становилась все больше и в ряде районов могла достичь порядка $0,1^{\circ}\text{C}$, что принципиально важно при оценивании роли различных факторов в изменении климата. В работе [Шерстюков, 2008] показано, что полноценный архив данных наблюдений даже для территории Европы (с координатами от 10° западной долготы до 60° восточной долготы) считается только с 1977 года, то есть для периода, когда началось устойчивое во времени современное потепление климата. Считать, что имеющаяся неоднородность рядов не влияет на результаты исследований изменений климата в крупных регионах, а также территории Северного и Южного полушарий, нет достаточных оснований [Логинов, Лысенко, 2019; Логинов, 2021]. Подчеркивается, что отмеченные недостатки данных могут влиять на доказательность полученных оценок влияния различных внешних и внутренних факторов на климат. В отдельных случаях введение в анализ дополнительных баз данных принципиально изменяло результаты оценки изменений климата [Lewandowsky et al., 2018].

Результаты и обсуждение

Одним из дискуссионных вопросов остается оценка роли аэрозолей естественного (вулканогенные и биогенные), а также антропогенного происхождения.

Единственным доступным материалом, позволяющим оценить влияние аэрозолей естественного и антропогенного происхождения на климат за более чем 100-летнюю историю

являются данные наземных актиметрических наблюдений на мировой сети станций. Нами был выполнен анализ ежедневных значений прямой солнечной радиации для случаев безоблачного неба и отсутствия дымки, приведенных к массе атмосферы $m=2$ [Логинов, 2012], а также проведено нормирование потока прямой солнечной радиации на 20 длиннорядных станциях Северного полушария (от 32° до 62° северной широты), расположенных на равнинной территории и на 8 горных станциях бывшего Советского Союза, по отношению к многолетним средним за период с 1881 по 1988 год. Значения прямой солнечной радиации за два года (1881 и 1882 год) были определены по косвенным данным.

На рисунке 1 представлен многолетний ход изменений прямой солнечной радиации за период с 1881 по 1988 год. К сожалению, мы не располагаем данными наблюдений за прямой солнечной радиацией по мировой сети актиметрических станций после 1988 года. В

определенной мере заменить эти данные позволяет такая характеристика состояния атмосферы, как фактор мутности Линке (T_2), значения которого приведены к массе атмосферы $m=2$ [Махоткина, Плахина, Лукин, 2005]. Эти данные для территории России за период с 1976 по 2010 год любезно предоставлены нам Е.Л. Махоткиной (Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова).

Проведенная нами соответствующая обработка данных позволила получить непрерывный ряд изменений прямой солнечной радиации за период с 1881 по 2010 год [Логинов, 2012; Логинов, Лысенко, 2019]. Многолетние значения прямой солнечной радиации в отклонениях от нормы (в %) с использованием различных статистических процедур и оценок мощности вулканических извержений разных авторов были преобразованы в индекс радиационного воздействия аэрозолей естественного и антропогенного происхождения на климат (в $Вт/м^2$).

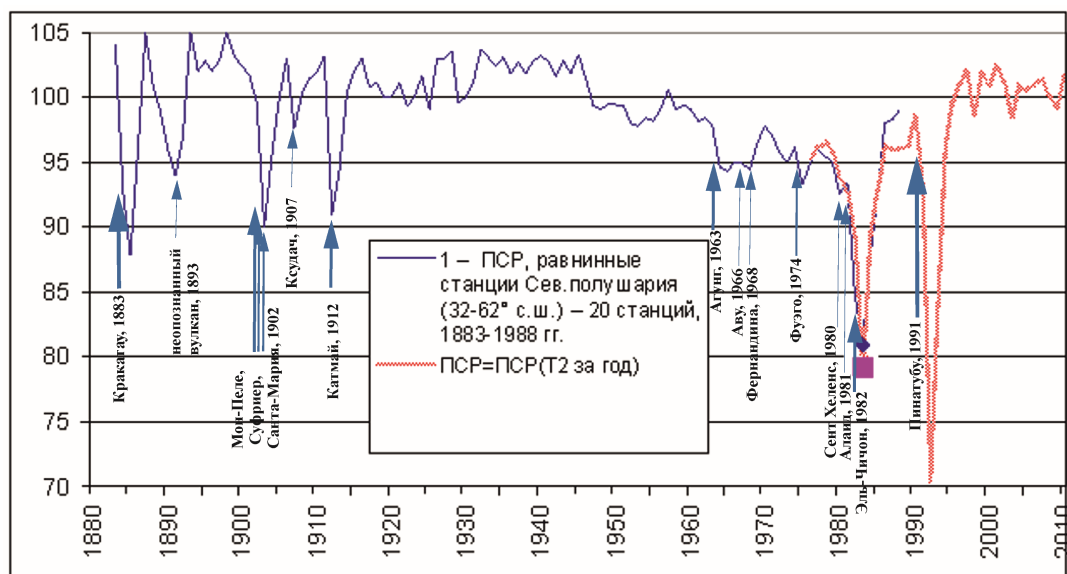


Рисунок 1. Аномалии потока прямой солнечной радиации (в % от многолетней нормы) по инструментальным данным за период с 1881 по 1988 год и восстановленные по регрессионным зависимостям между потоком солнечной радиации и фактором мутности Линке T_2 .

Стрелками отмечены вулканические извержения за исследуемый период.

Толщина стрелки соответствует мощности извержения.

Figure 1. Anomalies in the flux of direct solar radiation (in % of the long-term norm) according to instrumental data for 1881–1988 and reconstructed from regression dependences between the solar radiation flux and Linke's turbidity factor T_2 .

Arrows indicate volcanic eruptions during the study period.

The thickness of the arrow corresponds to the power of the eruption.

Данные по изменению фактора мутности Линке (T2) на территории России в период с 1976 по 2010 год показали, что в период извержения вулкана Пинатубо в 1991 году и последующих двух лет T2 было равно 3,40, тогда как в предшествующие 5 лет только 2,82, а в период с 1994 по 2010 год – 2,66, то есть меньше соответственно в 1,20 и 1,28 раза. Это свидетельствует о том, что спустя два года после извержения вулкана Пинатубо аэрозольная загрязненность атмосферы быстро уменьшилась. Другой причиной тому была активная природоохранная деятельность в развитых странах, снижение промышленного производства после распада Советского Союза и социалистического лагеря, а также отсутствие мощных вулканических извержений в последние тридцать лет.

Приток прямой солнечной радиации на подстилающую поверхность за последние 130 лет испытывал значительные изменения в результате многолетних изменений аэрозольного загрязнения атмосферы. Соотношение влияния аэрозолей естественного (вулканогенного) и антропогенного происхождения, как показало наше исследование [Логинов, 2012], существенно изменялось: в период с 1881 до середины 1940-х годов доминирующей в изменении притока прямой солнечной радиации была роль вулканического аэрозоля. В период с 1883 по 1914 год происходило снижение прямой солнечной радиации в результате многократного увеличения в атмосфере вулканического аэрозоля, а начиная с 1915 года происходило очищение атмосферы от вулканического аэрозоля и увеличение притока солнечной радиации на подстилающую поверхность. Со второй половины 1940-х годов до конца 1960-х годов наблюдался комбинированный эффект вулканических и антропогенных аэрозолей в изменении прямой солнечной радиации с

доминированием антропогенных аэрозолей. Однако уже в первой половине 1960-х годов и до начала 1990-х годов существенно увеличилась роль вулканогенных аэрозолей в изменении притока прямой солнечной радиации на подстилающую поверхность. Это доминирование продолжалось вплоть до 1993 года, после чего комбинированный эффект снижения аэрозолей вулканического и антропогенного происхождения на приток солнечной радиации стал уменьшаться.

Следует отметить, что антропогенный аэрозоль обладает несколькими другими физическими свойствами и временной динамикой, по сравнению с вулканическим аэрозолем, за последние 130 лет [Klimont, Smith, Cofala, 2013.]. На рисунке 2 показаны временные ряды температуры Земного шара (месячные значения и их скользящие 12-месячные средние по данным HadCRUT4) и глобальной эмиссии диоксида серы (по данным Центра социально-экономических данных и приложений Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (далее – NASA). На рисунке 2 следует быстрый рост глобальной эмиссии диоксида серы в послевоенное время до середины 1970-х годов, затем наступила кратковременная стабилизация их содержания в атмосфере, сменившаяся падением в начале 1990-х годов. Наши данные, приведенные в работе [Логинов, 2012], и данные на рисунке 2 подтверждают это снижение и быстрый рост аэрозольного антропогенного загрязнения, начиная с 1960-х годов и очищение атмосферы от аэрозоля в 1990-е и последующие годы. Из рисунка 2 также следует, что между изменениями глобальной температуры и содержанием антропогенного аэрозоля отсутствует какая-либо определенная связь за рассмотренный период времени.

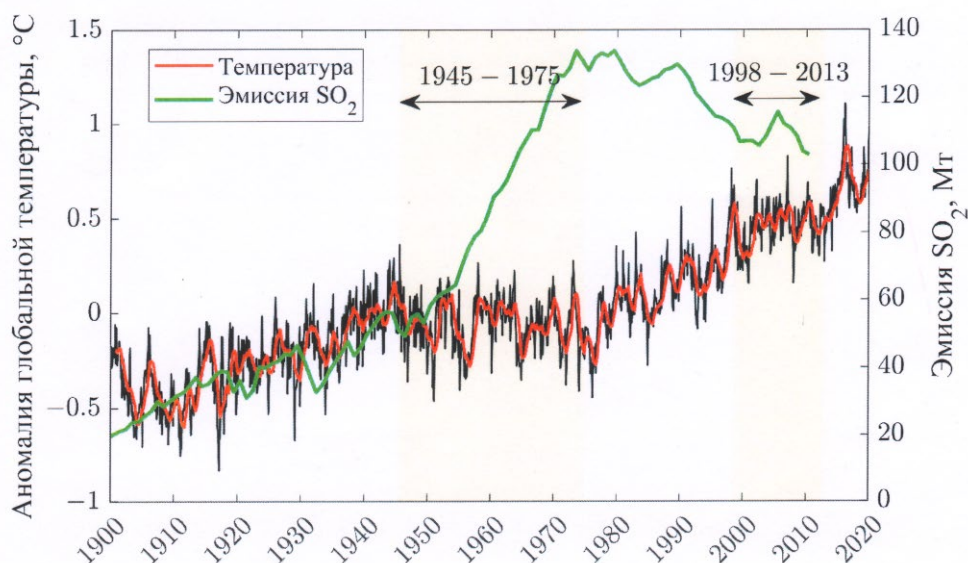


Рисунок 2. Временные ряды температуры Земного шара (месячные значения и их скользящее 12-месячное среднее по данным HadCRUT4) и глобальной эмиссии диоксида серы. Данные Центра социально-экономических данных и приложений NASA².

Figure 2. Time series of global temperature (monthly values and their 12-month moving average from HadCRUT4 data) and global sulfur dioxide emissions. Data from the NASA Center for Socio-Economic Data and Applications.

Аэрозольные эффекты в изменении солнечной радиации особенно заметны в городских агломерациях. В работе [Кондратьев, 2006] показано уменьшение суммарной радиации на величину до 25 Вт/м² в результате ее поглощения антропогенным аэрозолем в загрязненных облаках. Влияние аэрозолей антропогенного происхождения распространяется на более обширные территории, чем городская агломерация: загрязняя снег, они приводят к уменьшению альбедо снежного покрова и тем самым способствуют изменению регионального климата на значительных территориях.

Влияние аэрозолей вулканогенного и антропогенного происхождения на климат исследовалось в многочисленных работах [Логинов, 1984; Асатуров и др., 1986; Кондратьев, 2006; Кароль, Решетников, 2014; Борзенкова, 2019; Чайнова, 2019]. Оценки их роли в изменении климата сильно различаются. В

подавляющем числе работ им отводится второстепенная роль в изменении современного климата по сравнению с парниковыми газами. Результаты настоящего исследования свидетельствуют о том, что этот вывод не является корректным, по крайней мере для периода времени с 1881 до 1975 год.

Рассмотрим накопленные суммы отклонений прямой солнечной радиации за период наличия в нашем распоряжении надежных и сравнительно однородных данных (рисунок 3а). Из рисунка следует, что накопленные суммы прямой солнечной радиации были отрицательными в период с 1891 по 1920 год. Стремительный рост накопленных сумм прямой солнечной радиации начался после крупнейшего извержения вулкана Катмай (1912 год) и продолжался до середины 1940-х годов. После, вплоть до 1960-х годов, накопленные суммы прямой солнечной радиации оставались положительными. На рисунке 3б приведены

² Met Office Hadley Centre observations datasets [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/data/current/download.html>. National and Regional Data Set by Source Category, v2.86: Historical Anthropogenic Sulfur Dioxide Emissions | SEDAC [Электронный ресурс]. URL: <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/haso2-anthro-sulfur-dioxide-emissions-1850-2005-v2-86>.

значения ледовитости высоких широт по данным HadISST1.1 (черная кривая) и реконструированная кривая ледовитости с использованием температурных данных наблюдений [Семенов, Латиф, 2022]. Согласие данных по ледовитости имеется только за период времени с 1960-х годов. Корректность гадлеевских данных за период с 1880 до 1960-х годов подвергнута сомнению в работе [Семенов, Латиф, 2022].

Совместный анализ накопленных сумм прямой солнечной радиации и реконструированного ряда ледовитости показывает их хорошее согласие:

– высокая ледовитость полярных широт совпадает с низкими накопленными суммами прямой солнечной радиации в периоды с 1900 по 1922 год и с 1965 по 1980 год;

– низкая ледовитость полярных широт (в период с 1923 по 1963 год) совпала с очищением атмосферы от вулканического аэрозоля в период с 1914 по 1946 год и относительно слабым увеличением в атмосфере концентрации антропогенного аэрозоля (в период с 1946 по 1955 год) и, как следствие, умеренным снижением притока прямой солнечной радиации в период с 1946 по 1963 год (рисунки 3а, 3б);

– начавшееся со второй половины 1990-х годов снижение притока прямой солнечной радиации согласуется с увеличением скорости снижения ледовитости в полярной шапке, но доминирующим фактором изменения ледовитости в этот период стало радиационное воздействие парниковых газов.

Таким образом, изменения притока прямой солнечной радиации, по крайней мере в период с 1881 по 1975 год, коррелируют с изменением ледовитости высоких широт. В последние три десятилетия происходило непропорционально быстрое по отношению к изменению притока прямой солнечной радиации уменьшение ледовитости, что может свидетельствовать о значительном усилении роли увеличения содержания парниковых газов и связанного с ними радиационного воздействия на климат высоких широт. Арктическое усиление скорости потепления свидетельствует об этом.

Обнаруженные тесные связи ледовитости Северного ледовитого океана с изменением притока прямой солнечной радиации могут быть интерпретированы следующим образом:

В климатической системе имеются только два звена, обладающие большой «памятью» и способные запасать тепло – это гидросфера и криосфера. За последние 50 лет океан поглотил около 90% энергии, поступившей в климатическую систему [Логоинов, 2021]. Оставшаяся часть была израсходована на таяние морского и материкового льда и нагревание подстилающей поверхности. Различие (разбаланс) приходящей и уходящей энергии на верхней границе слишком мал, чтобы быть измеренным спутниковыми приборами: они показывают достаточную стабильность радиационного баланса на верхней границе атмосферы. В 2008 году во время события мощного Эль-Ниньо наблюдалось дополнительное поглощение энергии на верхней границе атмосферы. Начиная с 2004 года около 3 000 буев зондировавших температуру в слое океана от 0 до 2 000 м, показали замедление увеличения содержания океанического тепла, но оно не согласуется с изменением энергии на верхней границе атмосферы. Авторы [Trenberth, Fasullo, 2010] задаются вопросом: «куда ушла энергия?». Некоторое количество тепла ушло на таяние морского арктического льда, таяние льда Гренландии и Антарктиды. Авторы показывают, что запасы тепла в океане растут в период с 1992 по 2003 год согласованно с затратами тепла на таяние криосферы. Общее потепление планеты составляет $0,6 \pm 0,2$ Вт/м². После 2000 года характер изменения радиационного баланса на верхней границе атмосферы все более не похож на наблюдаемый характер общего потепления климата в XXI веке, когда температура в период с 1998 до 2014 год увеличивалась с меньшей скоростью. Однозначного ответа на вопрос, куда ушла энергия, авторами не было представлено. В работе [Chen, Tung, 2018] указывалось, что замедление роста температуры в XXI веке связано со значительным поступлением тепла в глубины главным образом Атлантического и Южного океанов. Эти процессы сопровождалась

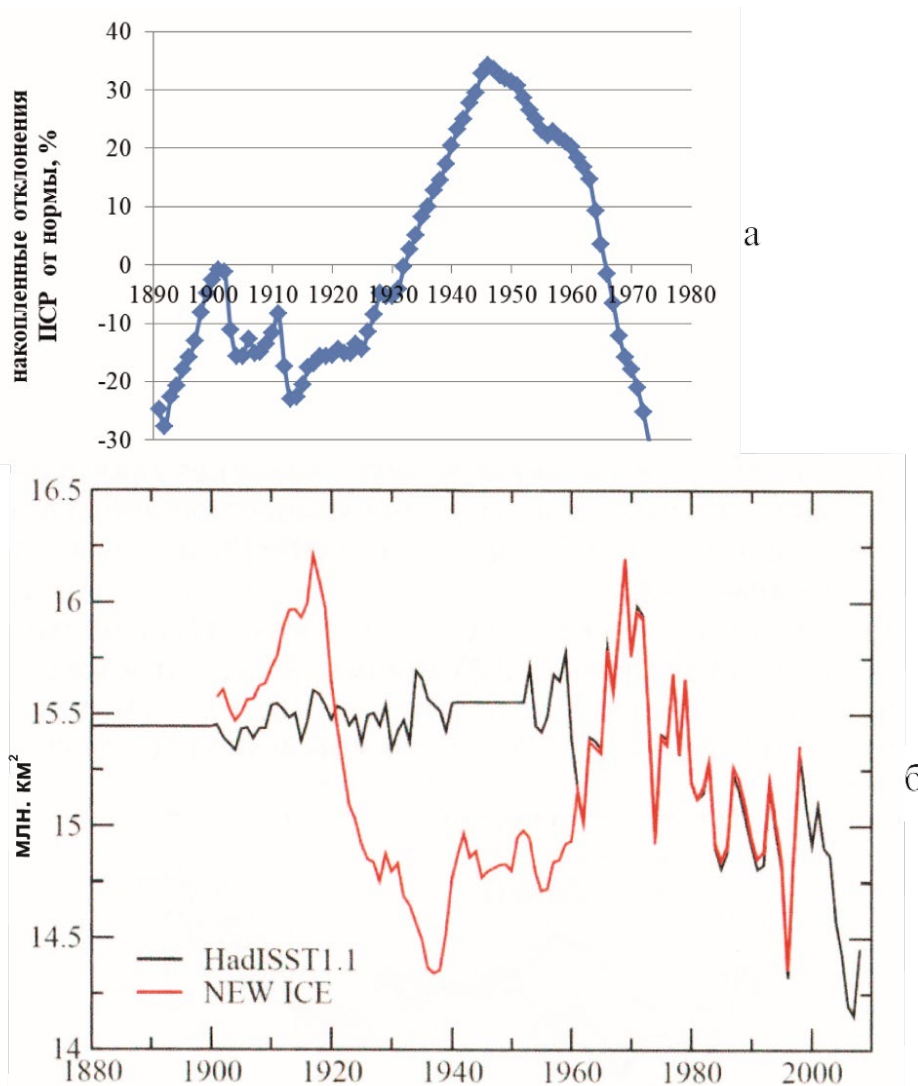


Рисунок 3. Накопленные отклонения прямой солнечной радиации от нормы (а) и площадь ледового покрова (млн км²) в Северном полушарии в зимний период (б) по данным HadISST 1.1 (черная кривая) и по данным, реконструированным для периода с 1900 по 1959 год с использованием приповерхностной температуры воздуха над арктическими морями (данные Арктического и антарктического научно-исследовательского института) в зимний период (ноябрь–апрель) [Семенов, Латиф, 2022]

Figure 3. Accumulated deviations of direct solar radiation from the norm (a) and Ice cover area (million km²) in the Northern Hemisphere in winter according (b) to HadISST 1.1 data (black curve) and according to data reconstructed for the period 1900–1959 using surface air temperature over the Arctic seas (Arctic and antarctic research institute data) in winter (November–April) [Semenov, Latif, 2022]

соленосной аномалией воды в субполярной Атлантике, что косвенно подтверждается нашими результатами [Логоинов, 2021].

В работе [Chen, Tung, 2014] показано, что океан накапливал и запасал тепловую энергию, поступающую от Солнца на глубинах до 1000 м, начиная со второй половины 1990-х годов до

конца 2010-х годов. Анализ глубинного разреза тепловой энергии, приведенной в работе, показал, что накопление тепла продолжалось и в течение последующих, по крайней мере, нескольких лет. Второй, менее выраженный период накопления тепла относился к периоду с конца 1920-х до середины 1940-х годов в Северной Атлантике.

Косвенным признаком такого процесса являлась высокая температура Мирового океана в указанный период. Теплой в этот период была и Северная Атлантика.

Известно, что летом, в течение длинного полярного дня, солнечная инсоляция в полярных широтах максимальная и ее колебания при изменении аэрозольного загрязнения атмосферы (аэрозольной оптической толщины, далее – АОТ) в полярных широтах будут также максимальными. Наибольшее увеличение аэрозольного загрязнения в полярной шапке обеспечивают вулканические извержения в Северном полушарии. Характерна также депрессия оптической толщины аэрозолей весной для Южного полушария в результате опускания частиц, вызванного оседанием в течение зимы. Вслед за разрушением полярного вихря оптическая толщина аэрозоля увеличивается, так как аэрозоль переносится к полюсу. Эти особенности менее заметны в Арктике, где полярный вихрь более слабый, чем в Южном полушарии.

При снижении АОТ дополнительное тепло, связанное с увеличением потока солнечной радиации, запасается на больших глубинах и может служить дополнительным источником тепла для атмосферы в последующие годы.

Принимая во внимание эти долгопериодные процессы в системе океан – атмосфера – ледовитость, можно объяснить характерные особенности изменения ледовитости полярных морей, отдавая при этом важнейшую модулирующую роль Мировому океану. В зависимости от временных масштабов океан может рассматриваться как внешний, так и внутренний фактор изменений климата. Для многовековых процессов в климатической системе океан может выступать и как внутренний фактор.

Колебания притока солнечной радиации на подстилающую поверхность в результате изменений АОТ играют ключевую роль в изменении климата, по крайней мере, в теплое время года в период времени до конца 1970-х годов. С 1970-х годов, принимая во внимание значительную скорость роста

концентрации антропогенных парниковых газов в атмосфере и их суммарную концентрацию, приведших к увеличению радиационного воздействия на климат до 1 Вт/м^2 , по отношению к преиндустриальной эре, имеется достаточно оснований признать доминирующую роль антропогенных факторов в изменении климата, но абсолютное доминирование с вероятностью 95–100% еще не достигнуто и вряд ли будет достигнуто, поскольку влияние вулканогенных и биогенных аэрозолей на изменения притока солнечной радиации и других естественных факторов (орбитальных параметров, солнечной активности и других) сохранится.

Выводы

Исследование связи внешних и внутренних факторов с температурой различных широтных зон Северного и Южного полушарий, а также с изменениями площади ледового и снежного покрова в Северном полушарии позволило выявить изменение названных характеристик и оценить причину формирования пауз в изменении температуры Северного полушария в периоды с 1946 по 1975 год и с 1998 по 2013 год в результате уменьшения содержания водяного пара естественного происхождения в средних широтах Северного полушария и СОТ в период с начала 1990-х годов по 2013 год, а также уменьшения содержания аэрозолей естественного (вулканического) происхождения в период с 1994 по 2022 год и антропогенного происхождения с начала 1990-х годов. Небольшое падение глобальной температуры в период с 1946 по 1975 год, которое также можно считать паузой в изменении климата, вероятно, было связано с быстрым ростом антропогенного загрязнения атмосферы. Радиационный форсинг парниковых газов в этот период увеличивался и его отрицательная связь с глобальной температурой противоречит положениям теории парникового потепления климата.

Изменениями содержания естественного и антропогенного аэрозоля (радиационным форсингом аэрозолей) можно качественно объяснить рост температуры Северного и Южного полушарий в период с 1920-х до

середины 1940-х годов (период потепления Арктики), а также снижение площади льда и снежного покрова в Северном полушарии в это время в результате очищения атмосферы от вулканического аэрозоля. Небольшой рост содержания антропогенного аэрозоля в это время не смог оказать существенного влияния на климат. Этот рост был характерен скорее только для двух регионов Земного шара (Североамериканского и Западноевропейского).

Второй период очищения атмосферы от вулканического аэрозоля наблюдался, начиная с середины 1990-х годов, поскольку с 1991 года на Земном шаре не было крупных вулканических извержений. Эпоха очищения от антропогенного аэрозоля наступила на 10 лет раньше. Значительное уменьшение антропогенного аэрозольного загрязнения сыграла активная природоохранная деятельность в развитых странах мира, что в совокупности с экономическим эффектом распада СССР привело к снижению аэрозольного загрязнения атмосферы не только в республиках бывшего Советского Союза, но и в ряде других европейских

государств, начиная с конца 1980-х – начала 1990-х годов.

Очищение атмосферы от вулканического и антропогенного аэрозоля в последние 25–30 лет способствовали увеличению скорости роста глобальной температуры в теплое время года, что подтверждается экспериментальными данными: паузы в изменении температуры в теплый период с 1998 по 2013 год не наблюдалось [Логинов, Лысенко, 2019; Логинов, 2021].

Вышеизложенное позволяет заключить, что разделительная линия доминирования влияния на климат естественных и антропогенных факторов приходится на 1960–1970-е годы; после 1970-х годов радиационный форсинг парниковых газов антропогенного происхождения стал доминирующим (более 70%). До середины 1940-х годов доминирование целиком принадлежало таким естественным климатообразующим факторам как аэрозоли вулканического происхождения и в какой-то степени солнечной активности. Период с 1950-х по 1970-е годы можно условно принять как переходные.

Литература

Абдусаматов Х.И. Солнце диктует климат Земли. СПб.: Изд-во «Logos», 2009. 197 с.

Асатуров М.Л., Будыко М.И., Винников К.Я., Гройсман П.Я., Кабанов А.С., Кароль И.Л., Коломеев М.П., Пивоварова З.И., Розанов Е.В., Хмелевцов С.С. Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 255 с.

Борзенкова И.И. Влияние вулканогенных вариаций природного аэрозольного слоя на климат и окружающую среду // Теоретические и экспериментальные основы стабилизации современного климата путем создания аэрозольных образований в нижней стратосфере: к 90-летию академика Ю.А. Израэля. М.: Институт глобального климата и экологии, 2019. С. 76–99.

Будыко М.И. Эволюция биосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 488 с.

References

Abdusamatov Kh.I. *Solntse diktuet klimat Zemli [The sun dictates the climate of the earth]*. St. Petersburg, Publ Logos, 2009. 197 p. (In Russian).

Asaturov M.L., Budyko M.I., Vinnikov K.Ya., Groisman P.Ya., Kabanov A.S., Karol' I.L., Kolomeev M.P., Pivovarova Z.I., Rozanov E.V., Khmelevtsov S.S. *Vulkany, stratosfernyi aerazol' i klimat Zemli [Volcanics, stratospheric aerosol and Earth's climate]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1986. 255 p. (In Russian; abstract in English).

Borzenkova I.I. Vliyanie vulkanogennykh variatsii prirodnogo aerazol'nogo sloya na klimat i okruzhayushchuyu sredyu [Influence of volcanogenic variations of the natural aerosol layer on the climate and the environment]. In: *Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy stabilizatsii sovremennogo klimata putem sozdaniya aerazol'nykh obrazovaniy v nizhnei stratosfere: k 90-letiyu akademika Yu.A. Izraelya [Theoretical*

Витинский Ю.И., Оля А.И., Сазонов Б.И. Солнце и атмосфера Земли / под ред. Э.Г. Мустеля. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 351 с.

Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий: проблема Киотского протокола // Материалы Совета-семинара при Президенте Российской академии наук. М.: Наука, 2006. 407 с.

Герман Дж.Р., Гольберг Р.А. Солнце, погода, климат / Перевод с англ. А.И. Оля, А.В. Цветкова. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 319 с.

Даценко Н.М., Монин А.С., Берестов А.А., Иванченко Н.Н., Сонечкин Д.М. О колебаниях глобального климата за последние 150 лет // Доклады Академии наук. 2004. Т. 399. № 2. С. 253–256.

Кароль И.Л., Решетников А.И. Парниковые газы, аэрозоли и климат // Труды Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. 2014. Вып. 573. С. 5–38.

Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок дистанционного зондирования. 1. Образование, свойства аэрозоля и их трансформация // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19. № 1. С. 5–22.

Кондратьев К.Я. Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования // Исследования Земли из космоса. 2004. № 2. С. 61–96.

Криволицкий А.А., Репнев А.И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 2009. 382 с.

Логинов В.Ф. Новый индекс солнечной активности // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Иркутск: Сибирский институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, 1972. Вып. 21. С. 141–151.

Логинов В.Ф. Вулканические извержения и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 64 с.

Логинов В.Ф. Радиационные факторы и доказательная база современных изменений климата. Мн.: Беларуская навука, 2012. 265 с.

and experimental bases for stabilizing the modern climate by creating aerosol formations in the lower stratosphere: on the 90th anniversary of Academician Yu.A. Izrael]. Ed.: Yu.A. Izrael'. Moscow, Publ. of Institute of Global Climate and Ecology, 2019, pp. 76–99. (In Russian; abstract in English).

Budyko M.I. *Evolutsiya biosfery [Biosphere evolution]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1984. 488 p. (In Russian).

Chayanova E.A. Estestvennaya izmenchivost' stratosfernogo aerolya i otsenka vliyaniya vulkanov na prizemnyuyu temperaturu atmosfery [Natural variability of stratospheric aerosol and assessment of the effect of volcanoes on the surface temperature of the atmosphere]. In: *Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy stabilizatsii sovremennogo klimata putem sozdaniya aeroly'nykh obrazovaniy v nizhnei stratosfere [Theoretical and experimental bases for stabilizing the modern climate by creating aerosol formations in the lower stratosphere]*. Ed.: Yu.A. Izrael'. Moscow, Publ. of Institute for Global Climate and Ecology, 2019, pp. 118–149. (In Russian).

Chen X., Tung K-K. Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation. *Nature*, 2018, vol. 559, no. 7714, pp. 387–391. DOI: [10.1038/s41586-018-0320-y](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0320-y).

Chen X., Tung K-K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. *Science*, 2014, vol. 345, no. 6199, pp. 897–903. DOI: [10.1126/science.1254937](https://doi.org/10.1126/science.1254937).

Datsenko N.M., Ivashchenko N.N., Sonechkin D.M., Monin A.S., Berestov A.A. Global climate oscillations over the last 150 years. *Doklady earth sciences*, 2004, vol. 399, iss. 8, pp. 1180–1183. (Russ. ed.: Datsenko N.M., Monin A.S., Berestov A.A., Ivashchenko N.N., Sonechkin D.M. O kolebaniyakh global'nogo klimata za poslednie 150 let. *Doklady Akademii nauk*, 2004, vol. 399, iss. 2, pp. 253–256).

Fedorov V.M. *Insolyatsiya Zemli i sovremennyye izmeneniya klimata [Insolation of the Earth and modern climate change]*. Moscow, Publ. Fizmatlit, 2018. 232 p. (In Russian).

- Логонов В.Ф. Диагноз глобального климата. СПб: Лема, 2021. 304 с.
- Логонов В.Ф., Лысенко С.А. Современные изменения глобального и регионального климата. Мн.: Беларуская навука, 2019. 318 с.
- Мак-Кормак Б.М., Селига Т.А. Итоги симпозиума и рабочего совещания // Солнечно-земные связи, погода и климат / под ред. Мак-Кормака Б.М., Селиги Т.А., пер. с англ. под ред. Г.И. Иванова-Холодного. М.: Мир, 1982. С. 13–43.
- Максимов И.В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 447 с.
- Малинин В.Н. Влагообмен в системе океан – атмосфера. Л.: Гидрометеиздат, 1994. 197 с.
- Малинин В.Н., Гордеева С.М., Наумов Л.М. Влагодержание атмосферы как климатообразующий фактор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 243–251. DOI: [10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251).
- Махоткина Е.Л., Плахина И.Н., Лукин А.В. Некоторые особенности изменения мутности атмосферы на территории России в последней четверти XX века // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 28–36.
- Монин А.С. Влияние планет на климат Земли // Глобальные изменения природной среды. М.: Научный мир, 2000. С. 122–128.
- Монин А.С., Шашков Ю.А. История климата. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 407 с.
- Моханакумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы / пер. с англ. Р.Ю. Лукьяновой; под ред. Г.В. Алексеева. М.: Физматлит, 2011. 452 с.
- Переведенцев Ю.П. Теория климата: учебное пособие. Казань: КГУ, 2009. 504 с.
- Покровский О.М. Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений // Исследования Земли из космоса. 2010. № 5. С. 11–24.
- Сазонов Б.И. Суровые зимы и засухи. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 239 с.
- Семенов В.А., Латиф М. Роль колебаний площади арктического ледового покрова в Folland C.K., Sexton D.M.H., Karoly D.J.K., Johnston C.E., Rowell D.P., Parker D.E. Influences of anthropogenic and oceanic forcing on recent climate change. *Geophysical Research Letters*, 1998, vol. 25, iss. 3, pp. 353–356. DOI: [10.1029/97GL03701](https://doi.org/10.1029/97GL03701).
- Gregory K.B. Water Vapor Decline Cools the Earth: NASA Satellite Data. *Friends of Science*, 2013. Available at: https://friendsofscience.org/assets/documents/Water_Vapor_Decline_Cools_the_Earth_NASA_Satellite_Data.htm.
- Haustein K., Allen M.R., Forster P.M., Otto F.E.L., Mitchell D.M., Matthews H.D., Frame D.J. A real-time Global Warming Index. *Scientific Reports*, 2017, 7, 15417. DOI: [10.1038/s41598-017-14828-5](https://doi.org/10.1038/s41598-017-14828-5).
- Herman J.R., Goldberg R.A. *Sun, weather, and climate*. Washington, Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, 1978. 360 p. (Russ. ed.: German Dzh.R., Gol'berg R.A. *Solntse, pogoda, klimat*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1981. 319 p.)
- IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2007. 996 p.
- IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
- Karol I.L., Reshetnikov A.I. Parnikovye gazy, aerzoli i klimat [Greenhouse gases, aerosol and climate]. *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii imeni A.I. Voeikova [Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov]*, 2014, vol. 573, pp. 5–38. (In Russian; abstract in English).
- Kirkby J., Curtius J., Almeida J., Dunne E., Duplissy J., Ehrhart S., Franchin A., Gagné S.,

формировании температурных аномалий в Арктике // *Климат Арктики: процессы и изменения* / под ред. И.И. Мохова, В.А. Семенова. М.: Физматкнига, 2022. С. 115–121.

Сидоренков Н.С. Небесно-механические причины изменения погоды и климата // *Геофизические процессы и биосфера*. 2015. Т. 14. № 3. С. 5–26.

Синицин В.М. Введение в палеоклиматологию. Л.: Недра, 1967. 232 с.

Федоров В.М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. М.: Физматлит, 2018. 232 с.

Чаянова Э.А. Естественная изменчивость стратосферного аэрозоля и оценка влияния вулканов на приземную температуру атмосферы // *Теоретические и экспериментальные основы стабилизации современного климата путем создания аэрозольных образований в нижней стратосфере* / под общей редакцией Ю.А. Израэля. М.: ФГБУ «Институт глобального климата и экологии», 2019. С. 118–149.

Шерстюков Б.Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2008. 246 с.

Chen X., Tung K.-K. Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation // *Nature*. 2018. Vol. 559. No. 7714. Pp. 387–391. DOI: [10.1038/s41586-018-0320-y](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0320-y).

Chen X., Tung K.-K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration // *Science*. 2014. Vol. 345. No. 6199. Pp. 897–903. DOI: [10.1126/science.1254937](https://doi.org/10.1126/science.1254937).

Folland C.K., Sexton D.M.H., Karoly D.J.K., Johnston C.E., Rowell D.P., Parker D.E. Influences of anthropogenic and oceanic forcing on recent climate change // *Geophysical Research Letters*. 1998. Vol. 25. Iss. 3. Pp. 353–356. DOI: [10.1029/97GL03701](https://doi.org/10.1029/97GL03701).

Gregory K.B. Water Vapor Decline Cools the Earth: NASA Satellite Data [Электронный ресурс] // *Friends of Science*. 2013.

Ickes L., Kürten A., Kupc A., Metzger A., Riccobono F., Rondo L., Schobesberger S., Tsagkogeorgas G., Wimmer D., Amorim A., Bianchi F., Breitenlechner M., David A., Dommen J., Downard A., Ehn M., Flagan R.C., Haider S., Hansel A., Hauser D., Jud W., Junninen H., Kreissl F., Kvashin A., Laaksonen A., Lehtipalo K., Lima J., Lovejoy E.R., Makhmutov V., Mathot S., Mikkilä J., Minginette P., Mogo S., Nieminen T., Onnela A., Pereira P., Petäjä T., Schnitzhofer R., Seinfeld J.H., Sipilä M., Stozhkov Y., Stratmann F., Tomé A., Vanhanen J., Viisanen Y., Vrtala A., Wagner P.E., Walther H., Weingartner E., Wex H., Winkler P.M., Carslaw K.S., Worsnop D.R., Baltensperger U., Kulmala M. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. *Nature*, 2011, vol. 476, iss. 7361, pp. 429–433. DOI: [10.1038/nature10343](https://doi.org/10.1038/nature10343).

Klimont Z., Smith S.J., Cofala J. The last decade of global anthropogenic sulfur dioxide: 2000–2011 emissions. *Environmental Research Letters*, 2013, vol. 8., no. 1, 014003. DOI: [10.1088/1748-9326/8/1/014003](https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014003).

Kondratyev K.Ya. Aerosol and climate studies: current state and prospects. 1. Aerosol formation, its properties, and their transformations. *Atmospheric and oceanic optics*, 2006, vol. 19, no. 01, pp. 1–16. (Russ. ed.: Kondrat'ev K.Ya. Aerozol' i klimat: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razrabotok distantsionnogo zondirovaniya. 1. Obrazovanie, svoistva aerolya i ikh transformatsiya. *Optika atmosfery i okeana*, 2006, vol. 19, iss. 1, pp. 5–22).

Kondratyev K.Ya. Global'nye izmeneniya klimata: dannye nablyudenii i rezul'taty chislennogo modelirovaniya [Global climate change: observation data and simulation modelling results]. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa [Earth exploration from space]*, 2004, no. 2, pp. 61–96. (In Russian; abstract in English).

Krivolutskii A.A., Repnev A.I. *Vozdeistvie kosmicheskikh faktorov na ozonosferu Zemli [Influence of cosmic factors on the Earth's ozoneosphere]*. Moscow, Publ. GEOS, 2009. 382 p. (In Russian).

URL: https://friendsofscience.org/assets/documents/Water_Vapor_Decline_Cools_the_Earth_NASA_Satellite_Data.htm.

Haustein K., Allen M.R., Forster P.M., Otto F.E.L., Mitchell D.M., Matthews H.D., Frame D.J. A real-time Global Warming Index // *Scientific Reports*. 2017. 7. 15417. DOI: [10.1038/s41598-017-14828-5](https://doi.org/10.1038/s41598-017-14828-5).

IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007. 996 p.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

Kirkby J., Curtius J., Almeida J., Dunne E., Duplissy J., Ehrhart S., Franchin A., Gagné S., Ickes L., Kürten A., Kupc A., Metzger A., Riccobono F., Rondo L., Schobesberger S., Tsagkogeorgas G., Wimmer D., Amorim A., Bianchi F., Breitenlechner M., David A., Dommen J., Downard A., Ehn M., Flagan R.C., Haider S., Hansel A., Hauser D., Jud W., Junninen H., Kreissl F., Kvashin A., Laaksonen A., Lehtipalo K., Lima J., Lovejoy E.R., Makhmutov V., Mathot S., Mikkilä J., Minginette P., Mogo S., Nieminen T., Onnela A., Pereira P., Petäjä T., Schnitzhofer R., Seinfeld J.H., Sipilä M., Stozhkov Y., Stratmann F., Tomé A., Vanhanen J., Viisanen Y., Vrtala A., Wagner P.E., Walther H., Weingartner E., Wex H., Winkler P.M., Carslaw K.S., Worsnop D.R., Baltensperger U., Kulmala M. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation // *Nature*. 2011. Vol. 476. Iss. 7361. Pp. 429–433. DOI: [10.1038/nature10343](https://doi.org/10.1038/nature10343).

Klimont Z., Smith S.J., Cofala J. The last decade of global anthropogenic sulfur dioxide: 2000–2011 emissions // *Environmental Research Letters*.

Lean J.L., Rind D.H. How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophysical Research Letters*, 2008, vol. 35, iss. 18, L18701. DOI: [10.1029/2008GL034864](https://doi.org/10.1029/2008GL034864).

Lemke P., Ren J., Alley R.B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Fujii Y., Kaser G., Mote P., Thomas R.H., Zhang T. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007, pp. 337–383.

Lewandowsky S., Cowtan K., Risbey J.S., Mann M.E., Steinman B.A., Oreskes N., Rahmstor S. The “pause” in global warming in historical context: (II). Comparing models to observations. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, no. 12, article number 123007. DOI: [10.1088/1748-9326/aaf372](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf372).

Loginov V.F. Novyi indeks solnechnoi aktivnosti [New index of solar activity]. In: *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa [Research on geomagnetism, aeronomy and solar physics]*. Irkutsk, Publ. of Siberian Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, 1972. vol. 21, pp. 141–151. (In Russian).

Loginov V.F. *Vulkanicheskie izverzheniya i klimat [Volcanic eruptions and climate]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1984. 64 p. (In Russian).

Loginov V.F. *Radiatsionnye faktory i dokazatel'naya baza sovremennykh izmenenii klimata [Radiation factors and the evidence base for modern climate change]*. Minsk, Publ. Belaruskaya navuka, 2012. 265 p. (In Russian).

Loginov V.F. *Diagnoz global'nogo klimata [Diagnosis of the global climate]*. St. Petersburg, Publ. Lema, 2021. 304 p. (In Russian).

Loginov V.F., Lysenko S.A. *Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata [Modern changes in the global and regional climate]*. Minsk, Publ. Belaruskaya navuka, 2019. 318 p. (In Russian).

2013. Vol. 8. No. 1. 014003.
DOI: [10.1088/1748-9326/8/1/014003](https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014003).

Pan-Eurasian Experiment (PEEX). Science Plan / eds. H.K. Lappalainen, M. Kulmala, S. Zilitinkevich. Helsinki, 2005. 315 p.

Lean J.L., Rind D.H. How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006 // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35. Iss. 18. L18701. DOI: [10.1029/2008GL034864](https://doi.org/10.1029/2008GL034864).

Lemke P., Ren J., Alley R.B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Fujii Y., Kaser G., Mote P., Thomas R.H., Zhang T. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007. Pp. 337–383.

Lewandowsky S., Cowtan K., Risbey J.S., Mann M.E., Steinman B.A., Oreskes N., Rahmstor S. The “pause” in global warming in historical context: (II). Comparing models to observations // *Environmental Research Letters*. 2018. Vol. 13. No. 12. Article number 123007. DOI: [10.1088/1748-9326/aaf372](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf372).

Scafetta N. A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2012. Vol. 74. Pp. 145–163. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.10.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.10.013).

Schmidt G.A., Ruedy R.A., Miller R.L., Lacis A.A. Attribution of the present-day total greenhouse effect // *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2010. Vol. 115. Iss. D20. D20106. DOI: [10.1029/2010JD014287](https://doi.org/10.1029/2010JD014287).

Trenberth K.E., Fasullo J.T. Tracking Earth's energy // *Science*. 2010. Vol. 328. Iss. 5976. Pp. 316–317. DOI: [10.1126/science.1187272](https://doi.org/10.1126/science.1187272).

Wang W., Matthes K., Tian W., Park W., Shangguan M., Ding A. Solar impacts on decadal variability of tropopause temperature and lower stratospheric (LS) water vapour: a mechanism through ocean–atmosphere coupling // *Climate*

Maksimov I.V. *Geofizicheskie sily i vody okeana [Geophysical forces and ocean waters]*. Leningrad, Publ. Hidrometeoizdat, 1970. 447 p. (In Russian).

Malinin V.N. *Vlagoobmen v sisteme okean – atmosfera [Moisture exchange in the ocean-atmosphere system]*. Leningrad, Publ. Hidrometeoizdat, 1994. 197 p. (In Russian).

Malinin V.N., Gordeeva S.M., Naumov L.M. Vlagosoderzhanie atmosfery kak klimatoobrazuyushchii faktor [Total precipitable water of the atmosphere as a climate forcing factor]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2018, vol. 15, iss. 3, pp. 243–251. DOI: [10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251).

Makhotkina E.L., Lukin A.B., Plakhina I.N. Some features of atmospheric turbidity change over the Russian territory in the last quarter of the 20th century. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2005, vol. 30, iss. 1, pp. 20–27. (Russ. ed.: Makhotkina E.L., Plakhina I.N., Lukin A.V. Nekotorye osobennosti izmeneniya mutnosti atmosfery na territorii Rossii v poslednei chetverti XX veka. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2005, iss. 1, pp. 28–36).

McCormack B.M., Seliga T.A. Results of the symposium and workshop. In: *Proceedings of a Symposium/Workshop «Solar-Terrestrial Influences on Weather and Climate» (Columbus, Ohio, August 24–28, 1978)*. Dordrecht, Boston, London, D.Reidel Publishing Company, 1978, pp. 13–43. (Russ. ed.: Mak-Kormak B.M., Seliga T.A. Itogi simpoziuma i rabochego soveshchaniya. In: *Solnechno-zemnye svyazi, pogoda i klimat*. Moscow, Publ. Mir, 1982, pp. 13–43).

Monin A.S. Vliyanie planet na klimat Zemli [The influence of planets on the Earth's climate]. In: *Global'nye izmeneniya prirodnoi sredy [Global variations of the environment]*. Moscow, Publ. Nauchnyi mir, 2000, pp. 122–128. (In Russian).

Monin A.S., Shashkov Yu.A. *Istoriya klimata [The History of Climate]*. Leningrad, Publ. Hidrometeoizdat, 1979. 407 p. (In Russian; abstract in English).

Dynamics. 2019. Vol. 52. Pp. 5585–5604.
DOI: [10.1007/s00382-018-4464-0](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4464-0).

Mohanakumar K. *Stratosphere troposphere interactions: An introduction*. Springer Science, 2008. 444 p. DOI: [10.1007/978-1-4020-8217-7](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8217-7). (Russ. ed.: Mokhanakumar K. *Vzaimodeistvie stratosfery i troposfery*. Moscow, Publ. Fizmatlit, 2011. 452 p.)

Pan-Eurasian Experiment (PEEX). Science Plan. Eds. Lappalainen H.K., Kulmala M., Zilitinkevich S. Helsinki, 2005. 315 p.

Perevedentsev Yu.P. *Teoriya klimata: uchebnoe posobie [Theory of climate: textbook]*. Kazan', Publ. of Kazan State University, 2009. 504 p. (In Russian).

Pokrovsky O.M. Analiz faktorov izmeneniya klimata po dannym distantsionnykh i kontaktnykh izmerenii [Climate Change Impact Factors Estimation by Data of Direct and Remote Sensing Measurements]. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa [Earth exploration from space]*, 2010, iss. 5, pp. 11–24. (In Russian; abstract in English).

Sazonov B.I. *Surovye zimy i zasukhi [Severe winters and droughts]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1991. 239 p. (In Russian).

Scafetta N. A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, vol. 74, pp. 145–163. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.10.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.10.013).

Schmidt G.A., Ruedy R.A., Miller R.L., Lacis A.A. Attribution of the present-day total greenhouse effect. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 2010, vol. 115, iss. D20, D20106. DOI: [10.1029/2010JD014287](https://doi.org/10.1029/2010JD014287).

Semenov V.A., Latif M. Rol' kolebanii ploshchadi arkticheskogo ledovogo pokrova v formirovaniy temperaturnykh anomalii v Arktike [The role of fluctuations in the area of the Arctic ice cover in the formation of temperature anomalies in the Arctic]. In: *Klimat Arktiki: protsessy i izmeneniya [Climate of the Arctic: processes and changes]*. Eds. I.I. Mokhov, V.A. Semenov. Moscow, Publ. Fizmatkniga, 2022, pp. 115–121. (In Russian).

Sherstyukov B.G. *Regional'nye i sezonnye zakonomernosti izmenenii sovremennogo klimata [Regional and seasonal patterns of modern climate*

change]. Obninsk, Publ. of VNIIGMI-MTsD, 2008. 246 p. (In Russian).

Sidorenkov N.S. Nebesno-mekhanicheskie prichiny izmeneniya pogody i klimata [Celestial-mechanical factors of the weather and climate change]. *Geofizicheskie protsessy i biosfera [Geophysical processes and the biosphere]*, 2015, vol. 15, iss. 3, pp. 5–26. (In Russian; abstract in English).

Sinitsin V.M. *Vvedenie v paleoklimatologiyu [Introduction to paleoclimatology]*. Leningrad, Publ. Nedra, 1967. 232 p. (In Russian).

Trenberth K.E., Fasullo J.T. Tracking Earth's energy. *Science*, 2010, vol. 328, iss. 5976, pp. 316–317. DOI: [10.1126/science.1187272](https://doi.org/10.1126/science.1187272).

Vitinskii Yu.I., Ol' A.I., Sazonov B.I. *Solntse i atmosfera Zemli [The Sun and the Earth's Atmosphere]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1976. 351 p. (In Russian).

Vozmozhnosti predotvrashcheniya izmeneniya klimata i ego negativnykh posledstviy: problema Kiotskogo protokola. Materialy Soveta-seminara pri Prezidente Rossiiskoi akademii nauk [Opportunities to prevent climate change and its negative consequences: the problem of the Kyoto Protocol. Materials of the Council-Seminar under the President of the Russian Academy of Sciences]. Moscow, Publ. Nauka, 2006. 407 p. (In Russian).

Wang W., Matthes K., Tian W., Park W., Shangguan M., Ding A. Solar impacts on decadal variability of tropopause temperature and lower stratospheric (LS) water vapour: a mechanism through ocean–atmosphere coupling. *Climate Dynamics*, 2019, vol. 52, pp. 5585–5604. DOI: [10.1007/s00382-018-4464-0](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4464-0).