

ПРИЧИНЫ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В АРКТИКЕ

В.М. Фёдоров, В.С. Чуков, Д.М. Фролов*

На основе ранее выполненных с высоким пространственным и временным разрешением по данным высокоточных астрономических эфемерид расчётов облучения проведён анализ изменения интенсивности летнего облучения в полярных и экваториальных пятиградусных широтных зонах Северного полушария. За период с 1900 по 2050 гг. отмечается уменьшение интенсивности летнего облучения в полярной и увеличение в экваториальной области. Следствием этого является увеличение меридионального градиента инсоляции и усиление интенсивности меридионального переноса радиационного тепла, с которым связано увеличение приповерхностной температуры воздуха и температуры поверхности океана в Арктике. Опережающий рост температуры в Арктике по сравнению с другими районами объясняется тем, что энергия (тепло) переносится с большей площади (источника тепла) на меньшую (области стока тепла). В летнее полугодие площадь области источника радиационного тепла в 4,5 раза превышает площадь области его стока. В результате этого удельные значения тепловой энергии – температуры – возрастают. Показано, что с использованием найденных связей характеристик природной среды в Арктике с характеристиками её облучения возможен прогноз изменения климата и состояния природной среды в Арктике на основе рассчитываемых в будущее характеристик облучения.

Ключевые слова: солнечная радиация, парниковый эффект, водяной пар, инсоляция, наклон оси, меридиональный перенос тепла, глобальный климат Земли.

Ссылка для цитирования: Фёдоров В.М., Чуков В.С., Фролов Д.М. Причины современных изменений климата в Арктике // Жизнь Земли. 2025. Т. 47, № 2. С. 203–214. DOI: 10.29003/m4689.0514-7468.2020_47_2/203-214.

Поступила 04.02.2025 / Принята к публикации 28.05.2025

CAUSES OF MODERN CLIMATE CHANGES IN THE ARCTIC

V.M. Fedorov¹, PhD, V.S. Chukov², D.M. Frolov¹

¹ Lomonosov Moscow State University (Faculty of Geography)

² Expeditionary center "Arctic"

Based on our previously performed calculations of irradiation with high spatial and temporal resolutions, using data from high-precision astronomical ephemerides, changes in the intensity of summer irradiation in the polar and equatorial 5-degree latitude zones of the Northern Hemisphere were analyzed. Over the period of 1900–2050 AD, a decrease in the intensity of summer irradiation in the polar region and its increase in the equatorial region were observed. The consequences of this phenomenon are an increase in the meridional gradient of insolation and an increase in the intensity of the meridional transfer of radiative heat associated with the rise of land surface air temperature and ocean surface temperature in the Arctic.

The faster temperature increase in the Arctic compared to other regions can be explained by the fact that energy (heat) is transferred from a larger area (heat source) to a smaller one (heat sink). In the summer half-year, the source area of radiative heat is 4.5

* Фёдоров Валерий Михайлович – в.н.с., к.г.н., географический ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова, fedorov.msu@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2305-7408; Чуков Владимир Семёнович – руководитель ЭЦ «Арктика», Chukov@arctica.msk.ru, ec-arctic@yandex.ru; Фролов Денис Максимович – н.с. географического ф-та МГУ им. М.В. Ломоносова, denisfrolov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0307-8175.

times greater than the sink area. As a result, the relative values of thermal energy (temperature) increase.

It is shown that based on the relationships between the patterns of the natural environment in the Arctic and the characteristics of its irradiation, it is possible to predict climate changes and the natural environment state in the Arctic on the basis of the characteristics of irradiation calculated for future time periods.

Keywords: solar radiation; greenhouse effect; water vapor; insolation; axis tilt; meridional heat transfer; global Earth climate.

For citation: Fedorov, V.M., Chukov, V.S., Frolov, D.M., "Causes of modern climate changes in the Arctic", *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] 47, no 2, 203–214 (2025) (in Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29003/m4689.0514-7468.2020_47_2/203-214.

Введение. Наиболее важным в проблеме исследования и прогнозирования изменений климата и связанных с ними последствий является вопрос о причинах, вызывающих эти изменения. Солнечная радиация является основным источником энергии, определяющим радиационный и тепловой баланс Земли. С широтными особенностями распределения солнечной радиации связано расположение климатических поясов (широтная зональность). С изменением радиационного тепла с высотой связана высотная поясность.

Климат Арктики определяется сезонными, межгодовыми и многолетними вариациями приходящей солнечной радиации, процессами её отражения (альbedo) и рассеивания. Особое значение в изменении облучения и меридионального переноса радиационного тепла имеет изменение угла наклона оси вращения Земли. Наклоном оси определяются сезонные изменения климата Арктики. При этом сезонные различия в динамике климата увеличиваются с географической широтой, достигая максимальных в районе Северного географического полюса (половина года – полярный день и половина года – полярная ночь). Здесь в течение большей части года отмечается отрицательный радиационный баланс. В то же время с изменением наклона оси связана интенсивность работы «тепловой машины первого рода» – меридионального переноса радиационного тепла (и влаги) из низких широт в высокие, что приводит к сглаживанию температурных различий по меридиану. Состав атмосферы (прежде всего, содержание H₂O) также является важным фактором, регулирующим термический режим в Арктике и определяющим величину альbedo (отражения приходящей от Солнца коротковолновой радиации), роль парникового эффекта планеты и её изменение [7, 9].

В XX веке отмечена тенденция повышения глобальной приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и температуры поверхности океана (ТПО), однако причины этого однозначно не определены. Особенно заметно последствия изменения глобального климата проявляются в арктических районах. Широко распространено мнение о том, что основной причиной изменения глобального климата является парниковый эффект, связанный, главным образом, с эмиссией парниковых газов, определяемой антропогенным фактором [15]. В то же время не подвергается сомнению то, что солнечная радиация имеет важнейшее значение в генезисе климата и в развитии жизни на Земле.

Актуальность темы определяется необходимостью прогнозирования изменений климата и связанных с ними последствий. Это представляется важным для стратегического планирования социально-экономического развития страны и регионов. Современное состояние природной системы Земли, характеризующееся климатом (статистическим набором гидрометеорологических показателей, усреднённых по времени для отдельных районов или Земли в целом), испытывает изменения, которые наиболее заметны в Арктике. Изменения, происходящие в природной арктической среде, выражаются

значительным увеличением приповерхностной температуры воздуха, температуры поверхности океана, повышением уровня океана (и термоденудацией морских берегов арктического побережья), сокращением площади морских льдов, горных и полярных ледников, сокращением времени залегания снежного покрова, деградацией многолетнемерзлых пород (и развитием солифлюкционных процессов и термокарста).

Эти природные явления создают риски для устойчивого социально-экономического развития арктических регионов, благополучия жизни людей. Потепление климата в Арктике выражено наиболее заметно. Так, согласно оценкам Росгидромета, на территории России потепление климата происходит примерно в 2,5 раза интенсивнее, чем в среднем по земному шару. В период 1976–2016 гг. температура на территории России увеличивалась на 0,45 °С за 10 лет, и особенно быстро в Арктике, где скорость роста достигает 0,8 °С за 10 лет. Наибольшая скорость роста среднегодовой температуры отмечается на побережье Северного Ледовитого океана (СЛО), особенно в Азиатской части России (на Таймыре – более +0,9 °С/10 лет) [5].

Особая актуальность рассматриваемой темы связана с неопределённостью в существующей системе прогнозирования (сценарные прогнозы), а также с масштабами и скоростью изменений глобального климата Земли. Значимость поисков причин изменения климата также определяется тем, что от состояния окружающей природной среды зависят условия жизни, благополучие и здоровье нации. Экономическая и политическая актуальность темы связана с вопросом реализации Парижского соглашения по климату, предусматривающего ведущую роль антропогенного фактора в эволюции современного климата.

Целью работы является определение роли радиационных (солярных) факторов в изменении современного климата в Арктике.

Методика расчёта инсоляции. Инсоляция Земли рассчитывалась с большим пространственным и временным разрешением. Расчёты выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид (DE-406, NASA) для всей поверхности Земли (без учёта атмосферы) в интервале с 3000 г. до н. э. по 2999 г. н. э. Исходными астрономическими данными для расчётов инсоляции были склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего (координатного времени – СТ) и всемирного корректируемого времени (UT). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 – Geodetic Reference System, 1980) с длинами полуосей, равными 6 378 137 м (большая) и 6 356 752 м (малая). В общем виде алгоритм расчётов можно представить выражением:

$$I_{nm}(\varphi_1, \varphi_2) = \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(\varphi) \left(\int_{-\pi}^{\pi} \Lambda(t, \varphi, \alpha) d\alpha \right) d\varphi \right) dt \quad (1),$$

где I – приходящая солнечная радиация за элементарный n -й фрагмент m -го тропического года (Дж); σ – площадной множитель (м^2), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал; $\sigma(\varphi)d\alpha d\varphi$ – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида; α – часовой угол, φ – географическая широта, выраженные в радианах; $\Lambda(\varphi, t, \alpha)$ – солнечная радиация в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида ($\text{Вт}/\text{м}^2$), t – время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1° , по широте 1° , по времени $1/360$ часть продолжительности тропического года с учётом её изменения. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Изменение активности Солнца не учитывалось [14].

Результаты и их обсуждение. Согласно отчётам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), увеличение глобальной температуры объясняется увеличением содержания CO_2 в атмосфере, которое связано с деятельностью человека¹. МГЭИК отмечает увеличение глобальной температуры с начала прошлого столетия приблизительно на 1°C . Однако при этом, если считать, что потепление определяется только парниковым эффектом, 80% ($0,8^\circ\text{C}$) связано с водяным паром [9]. Это понятно, т. к. около 70% поверхности планеты занято Мировым океаном, с поверхности которого испаряется вода; 20% ($0,2^\circ\text{C}$) связано с CO_2 (естественным и антропогенным) + другие газы. Доля антропогенного CO_2 по разным данным составляет от 1 до 5% [4, 6, 10]. Если принять 5% (хотя в прошлом столетии было явно меньше), то это составит от $0,2^\circ\text{C}$ всего $0,01^\circ\text{C}$. На эту величину за столетие увеличивается приповерхностная температура воздуха за счёт роста содержания в атмосфере двуокиси углерода антропогенного генезиса. Такой же вывод получен в работе [12]. Реальные причины современного изменения климата в основном определяются усилением переноса радиационного тепла из низких широт в высокие («тепловая машина первого рода»), которое связано с уменьшением наклона оси вращения Земли. Рассмотрим это подробнее.

Известно, что летняя инсоляция имеет особое значение в генезисе климата и его изменениях [3]. Климатические эффекты вариации летней инсоляции заключаются в следующем. Во-первых, при увеличении летнего облучения увеличивается температура, а также испарение и содержание водяного пара в атмосфере. Это приводит к усилению парникового эффекта и выделению дополнительного тепла, следствием чего является новое усиление испарения и т. д. Эти процессы, многократно повторяясь, приводят к формированию механизма усиления потепления климата. Во-вторых, происходит уменьшение альбедо за счёт сокращения площади морских льдов, ледников, сокращения продолжительности залегания снежного покрова (в умеренных и высоких широтах и в горных областях). Следствием этого является увеличение поверхности облучения и нагревания (материков и океанов), и от неё – атмосферы. При сокращении летней инсоляции, очевидно, происходят обратные процессы. В связи с этим динамика летней интенсивности облучения (ИО) приобретает особую значимость для исследований причин изменения климата.

Именно динамика летнего облучения на параллели 65° с. ш. положена в основу астрономической теории изменений климата. По летней инсоляции на 65° с. ш. корректируются результаты изотопного анализа ледовых кернов Антарктиды и Гренландии [8, 16, 17], настраивается модель/схема морских изотопных стадий LR04 [15], составляющая основу геохронологии и климатостратиграфии неоплейстоцена и голоцена. В связи с этим в работе большее внимание уделяется исследованию динамики летней ИО в высоких широтах Северного полушария.

Анализировалось рассчитанное ранее изменение интенсивности летнего облучения в пятиградусных широтных зонах Северного полушария. Летняя ИО на верхней границе атмосферы в Арктике в настоящее время сокращается (рис. 1). Таким образом, отмечаемое потепление климата в Арктике происходит на фоне сокращения интенсивности летнего облучения, вариации которого, таким образом, не являются причиной современного потепления в этом регионе.

Интенсивность летнего облучения с 1900 по 2050 г. в широтной зоне $80^\circ\text{--}85^\circ$ с. ш. сокращается на $0,153 \text{ Вт/м}^2$, в широтной зоне $85^\circ\text{--}90^\circ$ с. ш. – на $0,158 \text{ Вт/м}^2$. Это составляет $0,45\%$ и $0,47\%$ от средней за рассматриваемый период интенсивности летнего облучения этих зон соответственно. В то же время ИО экваториальной области возрастает (рис. 2).

¹ http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02135_seaice_index/

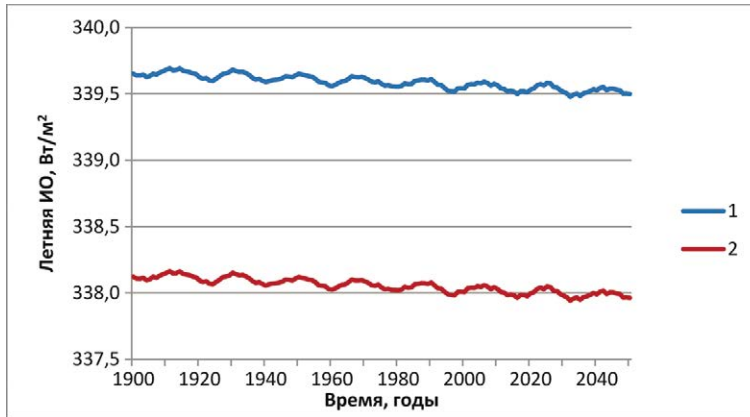


Рис. 1. Изменение интенсивности летнего облучения в широтных зонах 80°–85° (1) и 85°–90° (2) Северного полушария.

Fig. 1. Changes in summer irradiation intensity in the latitudinal zones of 80°–85° (1) and 85°–90° (2) of the Northern Hemisphere.

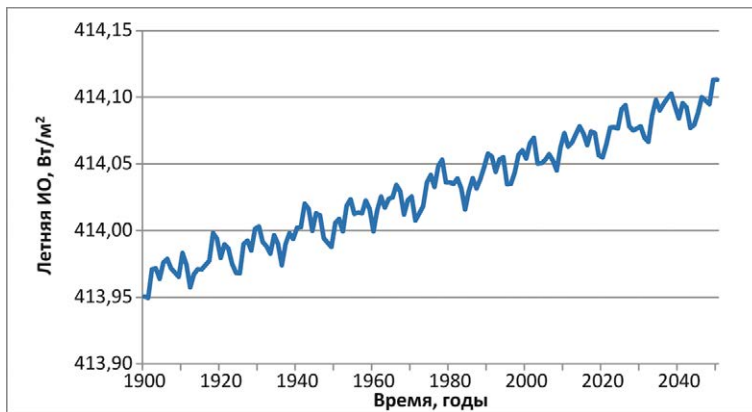


Рис. 2. Изменение интенсивности летнего облучения в широтной зоне 00°–05° с. ш.

Fig. 2. Changes in summer irradiation intensity in the latitudinal zone of 00°–05° N.

В широтной зоне 00°–05° с. ш. увеличение интенсивности летнего облучения в 2050 г. по сравнению с 1900 г. равно 0,163 Вт/м², в широтной зоне 05°–10° с. ш. – 0,154 Вт/м², что составляет 0,04 % от средней за период летней интенсивности этих широтных зон.

Таким образом, в области источника радиационного тепла интенсивность летнего облучения возрастает, а в области его стока сокращается. В результате увеличивается меридиональный градиент инсоляции, которым регулируется меридиональный перенос радиационного тепла (в атмосфере и влаги) из низких широт в высокие [11, 13]. Т. е. возрастает интенсивность работы «тепловой машины первого рода».

Для пятиградусных широтных зон Северного полушария рассчитывалась разность значений интенсивности летнего облучения, осреднённого за первое (1900–1909 гг.) и последнее (2041–2050 гг.) десятилетия. Летняя ИО пятиградусных широтных зон по разности усреднённых за первое и последнее десятилетия в период с 1900 по 2050 г.

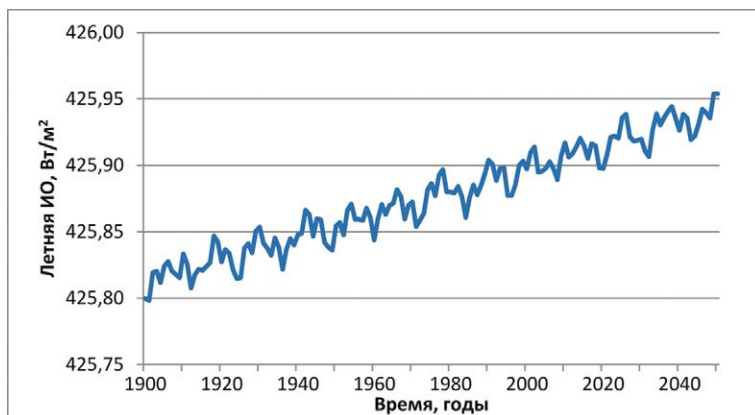


Рис. 3. Изменение интенсивности летнего облучения в широтной зоне 05° – 10° с. ш.
Fig. 3. Changes in summer irradiation intensity in the latitudinal zone of 05° – 10° N.

изменяется в диапазоне от $+12,8$ Вт/м² в широтной зоне 00 – 05 с. ш. до $-12,5$ Вт/м² в широтной зоне 85 – 90 с. ш. (рис. 4).

Полученный характер изменения ИО связан с изменением угла наклона оси вращения Земли. При уменьшении угла наклона оси вращения увеличивается облучение экваториальной области и уменьшается облучение полярных районов [11, 13]. Это является причиной отмечаемого в настоящее время увеличения меридионального градиента инсоляции (МГИ) и интенсивности меридионального переноса радиационного тепла.

Изменение интенсивности меридионального переноса (в океане и атмосфере) влияет на термический режим, сглаживая меридиональные температурные различия в полушарии. При этом следует иметь виду, что площадь областей стока тепла от 3 до 5 раз (в зависимости от времени года) меньше площади, из которой радиационное тепло поступает (источника тепла). Так, для летнего полугодия площадь области источника

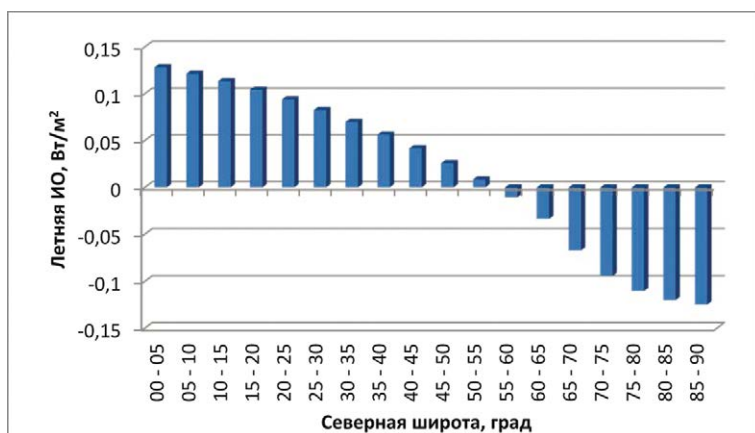


Рис. 4. Изменение интенсивности летнего облучения Северного полушария в период с 1900 по 2050 г.

Fig. 4. Changes in summer irradiation intensity of the Northern Hemisphere in the period from 1900 to 2050.

радиационного тепла (00° – 55°) равна $2,086 \cdot 10^{14}$ м². Площадь области стока радиационного тепла (55° – 90°) составляет $4,643 \cdot 10^{13}$ м². Т. е. в летнее полугодие площадь источника радиационного тепла в 4,5 раза превосходит область его стока. Таким образом, энергия (тепло) переносится с большей площади на меньшую и удельная характеристика энергии (температура) возрастает. Поэтому изменение температуры при изменении интенсивности переноса радиационного тепла проявляется наиболее заметно в арктических широтах. В Антарктике меридиональный перенос радиационного тепла в значительной степени блокируется зональным западным переносом («ревущие сороковые») в атмосфере и циркумполярным антарктическим течением в океане.

В качестве характеристики меридионального переноса радиационного тепла нами принята инсоляционная контрастность (ИК). Годовая ИК рассчитывается как разность годовой интенсивности облучения в широтной области 00° – 45° (источник тепла) и 45° – 90° (сток тепла) за год. В летней и зимней ИК учитываются сезонные смещения областей источника и стока тепла в полушариях. Так, летняя ИО рассчитывается как разность интенсивности летнего облучения в широтной области 00° – 55° (источник тепла) и 55° – 90° (сток тепла). Летняя и годовая ИК линейно связаны с изменением угла наклона оси вращения (связь отрицательная). ИК, таким образом, обобщённо по областям источника и стока тепла отражает динамику МГИ.

Изменения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ, рис. 5) и температуры поверхности океана (ТПО) в Северном полушарии (данные Университета Восточной Англии и Метеорологического бюро Хэдли за период с 1900 по 2020 г.) в основном учитываются трендами².

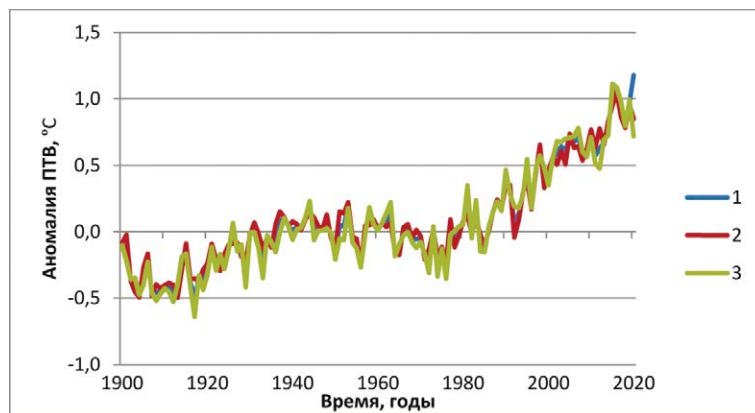


Рис. 5. Изменение приповерхностной температуры воздуха в Северном полушарии (1 – годовой, 2 – летней, 3 – зимней).

Fig. 5. Changes in surface air temperature in the Northern Hemisphere (1 – annual, 2 – summer, 3 – winter).

Значения коэффициента детерминации составляют от 0,693 до 0,862 (тренды – полиномы второй степени). Коэффициент детерминации показывает долю изменений ПТВ, определяемую трендом. Следовательно, чтобы объяснить тенденции многолетних изменений глобальной температуры в Северном полушарии (и в его северной части – Арктике), следует выявить фактор, определяющий тренды в исходных рядах ПТВ и ТПО. Анализ показывает, что многолетние изменения ПТВ и ТПО характеризуются тесными

² <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature>

положительными корреляционными связями с многолетними изменениями летней и годовой ИК, и отрицательными – с многолетними изменениями угла наклона оси. Напомним, что смена климатических сезонов (или температуры) в течение года связана с тем, что ось вращения Земли имеет наклон. Поэтому связь многолетних изменений (тенденции) глобальной температуры с изменением угла наклона оси вращения представляется закономерной и естественной. Выполненные по уравнениям регрессии (по ансамблю линейных и полиномиальных решений) расчёты показали, что многолетние изменения ПТВ и ТПО более чем на 2/3 определяются многолетними изменениями годовой (и летней) инсоляционной контрастности (табл. 1). С учётом атлантической мультитидакдадной осцилляции (АМО) регрессионной моделью объясняется около 86 % многолетних изменений ПТВ и ТПО в Северном полушарии.

Таблица 1. Многолетние изменения ПТВ и ТПО в Северном полушарии, объясняемые регрессионной моделью [11, 13]

Table 1. Long-term changes in the surface air temperature and ocean surface temperature in the Northern Hemisphere explained by the regression model [11, 13]

Факторы	Северное полушарие	
	ПТВ	ТПО
ИК	73,4 %	69,3 %
ИК + АМО*	86,4 %	86,6 %

Примечание: *АМО (Atlantic multidecadal oscillation) – геодинамическая осцилляция с периодом около 60 лет.

Физические механизмы найденной тесной связи многолетних изменений глобальной температуры (ПТВ и ТПО) с инсоляционной контрастностью в обобщённом виде могут быть выражены следующим образом. Связанное с уменьшением угла наклона увеличение ИК, регулирующей меридиональный перенос радиационного тепла, или интенсивность работы «тепловой машины первого рода», приводит к увеличению переноса тепла циркуляционными процессами и вихревыми образованиями в атмосфере и морскими течениями в океане из низких широт в высокие. Как отмечалось, площадь областей годового стока тепла в полушариях приблизительно в 3–5 раз меньше площади годовых областей источников тепла. Следовательно, переносимая из низких в высокие широты энергия (тепло) распределяется по меньшей площади, и её удельные характеристики (для тепловой энергии это температура) возрастают. В результате меридионального переноса тепла ТПО и ПТВ в областях его стока увеличиваются (явное тепло). Это приводит к увеличению испарения, повышению содержания водяного пара в атмосфере и усилению парникового эффекта. В результате происходит дополнительный приток тепла и рост температуры и т. д. Этот процесс, многократно повторяясь, формирует механизм усиления потепления климата. Кроме того, в результате конденсации из-за адвекции тёплых воздушных масс из низких в высокие широты выделяется скрытое тепло, которое вносит дополнительный вклад в схему радиационного теплообмена в атмосфере. Также следует учитывать положительные обратные связи – уменьшение альбедо из-за сокращения площади морских льдов, горных и покровных ледников, а также продолжительности залегания снежного покрова. В результате поверхность (материков и океанов) нагревается сильнее и от неё нагревается атмосфера. Эти механизмы могут быть причиной отмечаемого потепления климата. Ими объясняется и максимальное его потепление в Арктике. Ранее значение меридионального переноса тепла и влаги в изменениях климата Арктики отмечалось, например, в работе [1].

Одновременные измерения содержания углекислого газа в атмосфере и морской воде показывают, что содержание CO_2 в воде в основном близко к некоторому равновесному значению, отвечающему содержанию CO_2 в воздухе, но изменяется при понижении или повышении температуры воды соответственно в сторону повышения или понижения [7, 9]. При похолодании климата растворимость CO_2 в охлаждающейся морской воде возрастает, что (при условии стабильности источников CO_2) должно привести к понижению его парциального давления (содержания) в атмосфере [7]. Отмечаемое в настоящее время повышение температуры поверхности океана предполагает снижение растворимости CO_2 и увеличение его содержания в атмосфере. Учитывая, что около 71 % площади Земли занято Мировым океаном, такое сокращение растворимости CO_2 при повышении температуры поверхности океана и увеличении солёности может существенно влиять на увеличение содержания CO_2 в атмосфере. Вывод о том, что основным фактором, определяющим колебания содержания CO_2 в атмосфере, следует считать изменение обмена углекислым газом между океаном и атмосферой при изменении температуры океанических вод, на основе проведённых исследований был получен ещё в прошлом веке Е.П. Борисенковым и И.В. Алтуниным [2] и подтверждён Б.М. Смирновым [9] в этом столетии. Диоксид углерода, таким образом, является не причиной, а следствием изменений климата [8, 10–12]. Кроме того, связанной с деятельностью человека двуокисью углерода никак не объясняются более высокие, чем в других районах положительные значения аномалии ПТВ в Арктике в связи с тем, что CO_2 активно растворяется в холодных водах СЛО.

Следствием увеличения ПТВ и ТПО является сокращение площади морских льдов в СЛО. Поскольку интенсивность летнего (и годового) облучения в области стока радиационного тепла сокращается, то её изменения не могут быть фактором тенденции сокращения площади морских льдов. Изменения морских льдов в морях Российской Арктики также тесно связаны с тенденцией увеличения летней и годовой ИК, определяемой наклоном оси вращения Земли. Именно её изменениями определяется в основном тенденция сокращения площади морских льдов в Арктике. Площадь является важнейшим параметром ледяного покрова. Найденные связи изменения ПТВ, ТПО, площади морских льдов, уровня Мирового океана [11] с инсоляционной контрастностью (и другими характеристиками облучения) позволяют прогнозировать глобальные и региональные изменения температуры и состояния компонентов природной среды на основе рассчитываемых в будущее характеристик облучения.

С 1979 г. ведутся спутниковые наблюдения за изменением площади морского льда в СЛО. Имеющиеся спутниковые данные³ характеризуются высокими значениями коэффициента корреляции с летней ИК. Корреляция спутниковых данных по максимальной площади морских льдов СЛО с летней ИК характеризуется значением R , равным $-0,876$, по минимальной площади $-0,836$, по среднегодовой площади $-0,920$. По ансамблю уравнений линейной и полиномиальной регрессии с летней ИК в качестве предиктора рассчитывались значения площади морских льдов в СЛО на период до 2050 г. Расчёт дисперсии (по исходным значениям площади морских льдов и разности соответствующих исходных и рассчитанных значений) показывает, что многолетними изменениями летней ИК определяется 95,1 % многолетней изменчивости среднегодовой площади морских льдов, 93,5 % максимальной площади морских льдов и 89,2 % минимальной площади морских льдов в СЛО. На основе этих связей выполнен прогноз изменений площади морских льдов для СЛО.

В 2050 г. среднегодовая площадь морских льдов в СЛО составит 8,43 млн км^2 , максимальная площадь – 12,86 млн км^2 , минимальная – 1,87 млн км^2 . Относительно

³ http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02135_seaice_index/

2018 г. среднегодовая площадь в 2050 г. сократится на 1,89 млн км², максимальная – на 1,44 млн км², минимальная – на 2,84 млн км². Таким образом, относительно 2018 г. сокращение составит для среднегодовой площади 18,3 %, для максимальной площади – 10,1%, для минимальной площади морских льдов в СЛО – 60,3.

По данным спутниковых наблюдений⁴ анализировалась динамика площади морских льдов в отдельных морях СЛО (Российской Арктики). Корреляционный анализ показал, что тесная связь изменения площади морских льдов и летней ИК в масштабах отдельных морей в основном сохраняется. Так, для Баренцева моря R с летней ИК составляет $-0,782$, для Карского моря $-0,720$, для моря Лаптевых $-0,625$, для Восточно-Сибирского моря $-0,661$, для Чукотского моря $-0,818$. На основе найденных связей был выполнен оценочный прогноз изменения среднегодовой площади льдов в морях Российской Арктики до 2050 г. с летней ИК (сглаженной по 30-летним скользящим средним) в качестве предиктора. Результаты представлены по ансамблю линейных и полиномиальных решений (рис. 6).

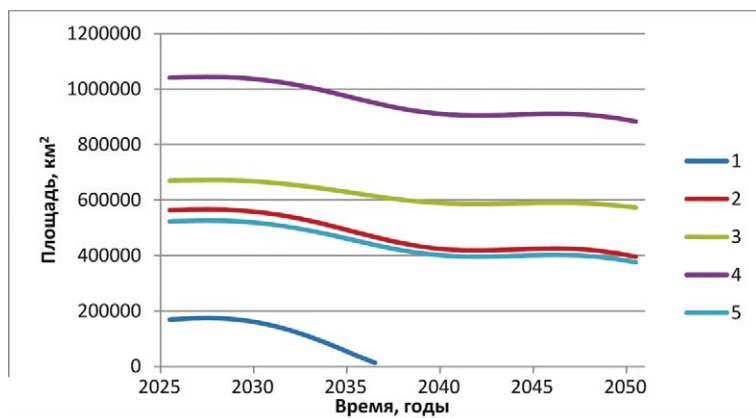


Рис. 6. Оценочный прогноз изменения среднегодовой площади морских льдов в морях Российской Арктики (1 – Баренцево море; 2 – Карское море; 3 – море Лаптевых; 4 – Восточно-Сибирское море; 5 – Чукотское море).

Fig. 6. Estimated forecast of changes in the average annual area of sea ice in the Russian Arctic seas (1 – Barents Sea; 2 – Kara Sea; 3 – Laptev Sea; 4 – East Siberian Sea; 5 – Chukchi Sea).

Расчёт дисперсии показывает, что многолетними изменениями ИК в Баренцевом море определяется 60,7 % многолетних изменений среднегодовых значений площади морских льдов, в Чукотском – 67,8 %. В остальных морях эти значения меньше. Так, в Карском море многолетними изменениями ИК (годовых для Северного полушария) определяется 51,8 % среднегодовых изменений площади морских льдов, в море Лаптевых – 38,9 %, в Восточно-Сибирском море – 44,0 %. Выполненный оценочный прогноз (см. рис. 6) показывает, что Баренцево море в середине 30-х гг. нашего столетия может быть круглый год свободным ото льда.

Опыт подобных прогнозных оценок изменения площади морских льдов на основе данных инсоляции может иметь практическое значение при разработке стратегических планов нового этапа освоения Российской Арктики. Полученные результаты могут оказаться полезными в практике нефте- и газодобычи на арктическом шельфе, в развитии

⁴ http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02135_seaice_index/

рыболовства, судоходства и при строительстве гидротехнических и иных сооружений в прибрежных районах и на островах Российской Арктики.

Потепление в Арктике приводит не только к сокращению площади морских льдов, но и к деградации многолетнемерзлых пород, увеличению глубины сезонно талого слоя, развитию термокарстовых и термоэрозионных процессов, а также отступанию берегов арктических морей в результате термоденудации и термоабразии. Перенос радиационного тепла в атмосфере из низких широт в высокие осуществляется в основном вихревыми образованиями – циклонами. Наибольшие изменения меридионального градиента инсоляции (МГИ) в настоящее время отмечаются в широтной зоне 60°–70° с. ш. – области максимального развития внетропических циклонов [10, 12]. Этим может объясняться усиление неустойчивости климата, частая смена погодных условий, изменение режима и интенсивности выпадения атмосферных осадков, увеличение числа ураганов в Арктике.

Заключение. Показано, что причинами глобального потепления современного климата являются естественные факторы. Основной из них является усиление интенсивности меридионального переноса радиационного тепла (и влаги в атмосфере) из низких широт в высокие. Этот процесс приводит к сглаживанию меридиональных температурных контрастов. Другой причиной является Атлантическая мультideкадная осцилляция (АМО), отражающая изменения температуры поверхности океана с периодом около 60 лет, связанные с приливным и возмущающим воздействием планет Солнечной системы (прежде всего, Юпитера и Сатурна) на орбитальное и вращательное движение Земли.

Увеличение содержания двуокси углерода в атмосфере является следствием потепления климата и определяется снижением растворимости CO₂ в связи с увеличением температуры поверхности океана. Опережающий рост температуры в Арктике объясняется усилением интенсивности меридионального переноса радиационного тепла (работы «тепловой машины первого рода») и определяется тем, что энергия (тепло) переносится с большей площади (источника тепла) на меньшую (области стока тепла). В результате этого удельные значения тепловой энергии – температуры – возрастают. Усилением интенсивности работы «тепловой машины первого рода» также в значительной степени определяется сокращение площади морских льдов в морях Российской Арктики.

Благодарности и источники финансирования. Работа выполнена в соответствии с госбюджетными темами «Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики» (121051100167-1) и «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 11–26.
2. Борисенков Е.П., Алтунин И.В. Рост углекислого газа в атмосфере и его влияние на климат // *Докл. АН СССР*. 1985. Т. 281, № 3. С. 559–561.
3. Воейков А.И. Климаты земного шара, в особенности России / *Собр. соч.* М.–Л.: АН СССР, 1948. Т. 1. С. 163–671.
4. Голубев В.Н. Роль арктического морского ледяного покрова в газообмене поверхностных геосфер // *Криосфера Земли*. 2010. Т. XIV, № 4. С. 17–29.
5. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. СПб: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2017. 106 с.
6. Елисеев А.В. Глобальный цикл CO₂: основные процессы и взаимодействие с климатом // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 4. С. 9–31. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-4-9-31.
7. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 246 с.
8. Монин А.С., Берестов А.А. Новое о климате // *Вестник РАН*. 2005. Т. 75, № 2. С. 126–138.
9. Смирнов Б.М. Физика глобальной атмосферы. Долгопрудный: ИД Интеллект, 2017. 256 с.

10. Снакин В.В. Низкоуглеродная энергетика и глобальное потепление климата // Жизнь Земли. 2024. Т. 46, № 1. С. 4–19. DOI: 10.29003/m3770.0514-7468.2024_46_1/4-19.
11. Фёдоров В.М. Эволюция современного глобального климата Земли и её возможные причины // Геориск. 2020. Т. XIV, № 4. С. 16–29.
12. Фёдоров В.М., Алтунин И.В., Фролов Д.М. Влияние диоксида углерода антропогенного генезиса на термический режим атмосферы и его изменения // Жизнь Земли. 2022. Т. 44, № 4. С. 402–414. DOI: 10.29003/m3115.0514-7468.2022_44_4/402-414.
13. Фёдоров В.М. Проблемы параметризации радиационного блока физико-математических моделей климата и возможности их решения // Успехи физических наук. 2023. Т. 193, № 9. С. 971–988. DOI: 10.3367/UFNr.2023.03.039339.
14. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC–AD 2999 // Springer Geology. 2020. V. 1. P. 181–192. DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_20.
15. Lisięcki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records // *Paleoceanography*. 2005. V. 20. PA1003. P. 1–17. DOI: 10.1029/2004PA001071.
16. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. 1999. V. 399. P. 429–437.
17. Veres D., Bazin L., Landais A. et al. The Antarctic ice core chronology (AICC2012): an optimized multi-parameter and multi-site dating approach for the last 120 thousand years // *Climate of the past*. 2013. V. 9, № 4. P. 1733–1748. DOI: 10.5194/cp-9-1733-2013.

REFERENCES

1. Alexeyev, G.V., “Manifestation and intensification of global warming in the Arctic”, *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija* [Fundamental and applied climatology] **1**, 11–26 (2015) (in Russian).
2. Borisenkov, E.P., Altunin, I.V., “Growth of carbon dioxide in the atmosphere and its influence on climate”, *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences] **281** (3), 559–561 (1985) (in Russian).
3. Voeykov, A.I., *Climates of the globe, especially of Russia. Collected works* (Moscow–Leningrad: USSR Academy of Sciences, 1948. V. 1) (in Russian).
4. Golubev, V.N., “The role of the Arctic sea ice cover in gas exchange of surface geospheres”, *Kriosfera Zemli* [Earth's cryosphere] **XIV** (4), 17–29 (2010) (in Russian).
5. *Report on climate risks in the Russian Federation* (St. Petersburg, 2017) (in Russian).
6. Eliseyev, A.V., “Global CO₂ cycle: main processes and interaction with climate”, *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija* [Fundamental and applied climatology] **4**, 9–31 (2017) (in Russian) DOI: 10.21513/2410-8758-2017-4-9-31.
7. Monin, A.S., *Introduction to the climate theory* (Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982) (in Russian).
8. Monin, A.S., Berestov, A.A., “New about climate”, *Vestnik RAN* [Bull. of Russian Academy of Sciences] **75** (2), 126–138 (2005) (in Russian).
9. Smirnov, B.M., *Physics of the global atmosphere* (Dolgoprudnyi: ID Intellect, 2017) (in Russian).
10. Snakin, V.V., “Low-carbon energy and global climate warming”, *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] **46** (1), 4–19 (2024) DOI: 10.29003/m3770.0514-7468.2024_46_1/4-19 (in Russian).
11. Fedorov, V.M., “Evolution of the Earth's modern global climate and its possible causes”, *Georisk* **XIV** (4), 16–29 (2020) (in Russian).
12. Fedorov, V.M., Altunin, I.V., Frolov, D.M., “The influence of carbon dioxide of anthropogenic genesis on the thermal regime of the atmosphere and its changes”, *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] **44** (4), 402–414 (2022). DOI: 10.29003/m3115.0514-7468.2022_44_4/402-414 (in Russian).
13. Fedorov, V.M., “Problems of parameterization of the radiation block of physical and mathematical climate models and the possibilities of their solution”, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Advances in Physical Sciences] **193** (9), 971–988 (2023). DOI: 10.3367/UFNr.2023.03.039339 (in Russian).
14. Fedorov, V.M., Kostin, A.A., “The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC–AD 2999”, *Springer Geology* **1**, 181–192 (2020). DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_20.
15. Lisięcki, L.E., Raymo, M.E., “A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records”, *Paleoceanography* **20**. PA1003, 1–17 (2005). DOI: 10.1029/2004PA001071.
16. Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., et. al., “Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica”, *Nature* **399**, 429–437 (1999).
17. Veres, D., Bazin, L., Landais, A., et.al., “The ice core chronology (AICC2012): an optimized multi-parameter and multi-site dating approach for the last 120 thousand years”, *Climate of the past* **9** (4), 1733–1748 (2013). DOI: 10.5194/cp-9-1733-2013.