

Том XIV | 4/2020  
Vol. XIV

ISSN 1997-8669 (Print)  
ISSN 2587-8220 (Online)

# GeoRisk

GeoRisk World



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



Саморегулируемая организация



Ассоциация  
«Инженерные изыскания  
в строительстве» —  
Общероссийское отраслевое  
объединение работодателей

## Геоманнитное поле и биологические катастрофы в фанерозое

**ГОРОДНИЦКИЙ А.М.**

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

8

## Эволюция современного глобального климата Земли и ее возможные причины

**ФЕДОРОВ В.М.**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

16

## Современные уроки Нефтегорского землетрясения

**КЛЯЧКО М.А.**

АНО «Региональный альянс для анализа и уменьшения бедствий»

30

## Аномальная подвижка оползня Бузулган в долине р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ) в 2020 г.

**БЕККИЕВ М.Ю., ДОКУКИН М.Д., КАЛОВ Р.Х., МАЛЬНЕВА И.В.**

Высокогорный геофизический институт

**АНАЕВ М.А.**

Главное управление МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике

**ВИСХАДЖИЕВА К.С.**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

44

## Факторы риска изменения качества воды в Бурейском водохранилище в зоне влияния крупного оползня

**КОНДРАТЬЕВА Л.М., ЛИТВИНЕНКО З.Н., АНДРЕЕВА Д.В.**

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН

**ГОЛУБЕВА Е.М.**

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН,  
Тихоокеанский государственный университет

56

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Обзор опасных природных явлений за октябрь — декабрь 2020 г.

**ШАНИНА В.В.**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

70

## Перечень научных специальностей с указанием соответствующих им отраслей науки, которым соответствует основное содержание рецензируемого научного издания:

25.00.03 – Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки);

25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки);

25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (технические науки);

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (геолого-минералогические науки);

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (физико-математические науки);

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (технические науки);

25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (географические науки);

25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (географические науки);

25.00.28 – Океанология (геолого-минералогические науки);

25.00.28 – Океанология (физико-математические науки);

25.00.31 – Гляциология и криология Земли (географические науки);

25.00.35 – Геоинформатика (географические науки);

25.00.35 – Геоинформатика (геолого-минералогические науки);

25.00.35 – Геоинформатика (технические науки);

25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (географические науки);

25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (геолого-минералогические науки).

Фото на обложке: <https://www.republica.com/wp-content/uploads/2019/12/28aa203dff0e23f88e0d6d5e4016d75.jpeg>

Photo on the cover: <https://www.republica.com/wp-content/uploads/2019/12/28aa203dff0e23f88e0d6d5e4016d75.jpeg>



## Geomagnetic field and biological catastrophes in the Phanerozoic

**GORODNITSKIY A.M.**

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

8

## Evolution of contemporary global climate of the Earth and its possible causes

**FEDOROV V.M.**

Lomonosov Moscow State University

16

## Lessons learned from the Neftegorsk earthquake nowadays

**KLYACHKO M.A.**

Regional Alliance for Disaster Analysis and Reduction ANPO

30

## Anomalous movement of Buzulgan landslide in the Gerhozhan-Su River valley (Central Caucasus) in 2020

**BEKKIEV M.Yu., DOKUKIN M.D., KALOV R.Kh., MALNEVA I.V.**

High-Mountain Geophysical Institute

**ANAEV M.A.**

Main Directorate of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters for the Kabardino-Balkarian Republic

**VISKHADZHIEVA K.S.**

Lomonosov Moscow State University

44

## Risk factors of change in water quality of the Bureyskoe Reservoir in the large landslide area

**KONDRATYEVA L.M., LITVINENKO Z.N., ANDREEVA D.V.**

Institute of Water and Ecological Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences

**GOLUBEVA E.M.**

Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences; Pacific National University

56

## SUPPLEMENT

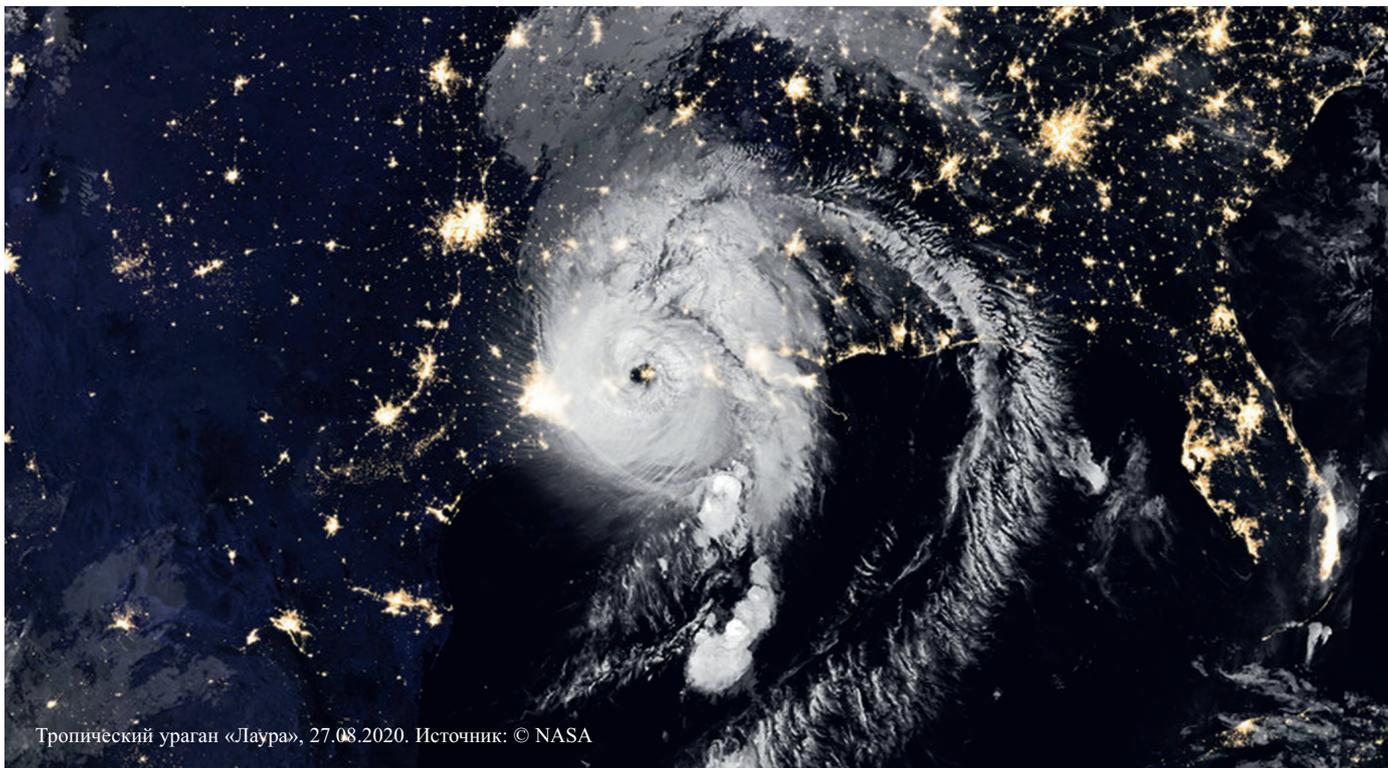
### Review of natural hazardous events for October – December of 2020

**SHANINA V.V.**

Lomonosov Moscow State University

70

# ЭВОЛЮЦИЯ СОВРЕМЕННОГО ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА ЗЕМЛИ И ЕЕ ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ



Тропический ураган «Лаура», 27.08.2020. Источник: © NASA

## ФЕДОРОВ В.М.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, fedorov.msu@mail.ru

Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия

*Оригинальная статья*

*Поступила в редакцию 02.11.2020 / Принята к публикации 24.12.2020 / Дата публикации 30.12.2020*

© ООО «Геомаркетинг», 2020

**Аннотация:** исследование изменений глобального климата является одной из важнейших научных и практических проблем, актуальность которой определяется необходимостью прогнозирования последствий этих изменений. Наиболее важным при решении данной проблемы является вопрос о причинах наблюдаемых изменений. Широко распространено мнение о том, что основным фактором, влияющим на глобальный климат, является парниковый эффект, связанный с эмиссией парниковых газов, определяемой антропогенным воздействием. В то же время не подвергается сомнению, что солнечная радиация имеет важнейшее значение в генезисе климата. Целью представленной статьи является определение роли инсоляционного фактора в глобальных климатических событиях позднего голоцена и в многолетних изменениях (эволюции) современного глобального климата. С учетом теоретически рассчитанных с высоким пространственным и временным разрешением значений инсоляции и инсоляционных характеристик солярного климата Земли рассматриваются возможные причины глобальных климатических событий в позднем голоцене и причины изменения современного глобального климата. Найден синхронизм глобальных климатических событий в позднем голоцене с экстремальными значениями инсоляционных характеристик. Определены возможные причины малого (средневекового) оптимума голоцена, связанные с максимумом меридионального переноса тепла в зимний период в Северном полушарии и максимумом межполушарного теплообмена. Установлен один из факторов, определивший малый ледниковый период, — минимум приходящей в Северное полушарие в летнее полугодие солнечной радиации. Выявлены возможные причины изменения современного глобального климата Земли, связанные с усилением меридионального переноса тепла, определяемого уменьшением угла наклона оси вращения Земли. Приводится описание физического механизма усиления глобального потепления и принципиальная схема радиационного теплообмена. Полученные результаты могут стать основой радиационного блока физико-математических моделей климата, способствовать совершенствованию методов прогнозирования его изменений, а также связанных с ними последствий, а кроме того, разработке мер по минимизации ущерба от возможных климатических рисков.

**Ключевые слова:** солнечная радиация; парниковый эффект; водяной пар; инсоляция; наклон оси; меридиональный градиент инсоляции; меридиональный перенос тепла; радиационный теплообмен; глобальный климат Земли

**Благодарности:** исследование выполнено по теме государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова № АААА-А16-116032810080-2 «Палеоклиматы, развитие природной среды и долгосрочный прогноз ее изменений».

**Ссылка для цитирования:** Федоров В.М., 2020. Эволюция современного глобального климата Земли и ее возможные причины. ГеоРиск, Том XIV, № 4, с. 16–29, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29>.

# EVOLUTION OF CONTEMPORARY GLOBAL CLIMATE OF THE EARTH AND ITS POSSIBLE CAUSES

VALERIY M. FEDOROV

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; fedorov.msu@mail.ru  
Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

*Original paper*

Received 2 November 2020 / Accepted 24 December 2020 / Published 30 December 2020

© Geomarketing LLC, 2020

**Abstract:** the study of global climate change is one of the most important scientific and practical problems. Its relevance is determined by the need to predict the consequences of climate changes. The most important issue in solving this problem is the question on the reasons for the observed changes. It's widely believed that the main factor influencing the global climate is the greenhouse effect associated with the emission of greenhouse gases determined by anthropogenic factors. At the same time, there is no doubt that solar radiation is essential in the climate genesis. The aim of this paper is to determine the role of the insolation factor in global climatic events of the Late Holocene and in long-term changes (evolution) of the modern global climate. Taking into account the theoretically calculated (with a high spatial and temporal resolution) values of insolation and insolation characteristics of the Earth's solar climate, the possible causes of global climatic events in the Late Holocene and the causes of changes in the current global climate are considered. The synchronism of global climatic events in the Late Holocene with extreme values of insolation characteristics was found. Possible reasons for the Holocene Medieval Warm Period associated with the maximum meridional heat transfer in winter in the Northern Hemisphere and the maximum interhemispheric heat transfer have been determined. One of the reasons for the Little Ice Age associated with the minimum of incoming solar radiation in the Northern Hemisphere in the summer half of the year has been identified. Possible causes of changes in the current global climate of the Earth associated with an increase in the meridional heat transfer determined by a decrease in the angle of inclination of the Earth's rotation axis are determined. A description of the physical mechanism of global warming enhancement and a schematic diagram of radiation heat transfer are given. The obtained results can form the basis of the radiation block of physical and mathematical climate models, contribute to the improvement of methods for predicting its changes, as well as the associated consequences, and, in addition, to the development of measures to minimize damage from possible climatic risks.

**Key words:** solar radiation; greenhouse effect; water vapor; insolation; axis tilt; meridional insolation gradient; meridional heat transfer; radiative heat exchange; global Earth climate

**Acknowledgements:** the research was carried out under the state assignment of the Lomonosov Moscow State University No. AAA-A16-116032810080-2 "Paleoclimates, development of the natural environment, and long-term forecast of its changes".

**For citation:** Fedorov V.M., 2020. Evolution of contemporary global climate of the Earth and its possible causes. *GeoRisk World*, Vol. XIV, No. 4, pp. 16–29, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29>.

## Введение

Климат — важнейшая характеристика природной среды обитания человека, поэтому исследование изменений глобального климата является одной из важнейших научных и практических проблем. Ее актуальность определяется необходимостью прогнозирования последствий климатических изменений для природной среды, человека и общества. Наиболее важным при решении указанной проблемы является вопрос о причинах, вызывающих эти изменения [5, 8–10]. Среди возможных факторов формирования и изменения климата основными считаются солнечная радиация, парниковый эффект, вулканическая деятельность и механизмы теплообмена.

Солнечная радиация является основным источником энергии, определяющим радиационный и тепловой баланс Земли. С широтными особенностями ее распределения связано расположение климатических поясов (широтная зональность). С изменением количества радиационного тепла с высотой связана

высотная поясность. В древности Гиппархом (древнегреческий астроном, географ и математик II в. до н.э.) было дано объяснение годовой смене климатических сезонов. Она объяснялась изменением наклона падения солнечных лучей, связанным с орбитальным движением Земли и наклоном оси ее вращения («климат» в переводе с греческого языка означает «наклон»). Кроме сезонных отмечаются межгодовые и многолетние изменения климата, причины которых пока однозначно не определены.

В регулировании поступления солнечной радиации к Земле (без учета атмосферы) и распределении ее по земной поверхности (солярный климат Земли) выделяются два механизма, имеющие различную физическую природу. Один из них связан с изменением активности Солнца. Другой определяется небесно-механическими процессами, изменяющими элементы земной орбиты (расстояние Земля — Солнце, продолжительность тропического года и др.), наклон оси вращения и связанные с ними изменения в поступлении солнечной ра-

диации и ее распределении по широтам и сезонам. Именно этот механизм и анализируется в данной работе.

В перераспределении радиационного тепла в природной системе Земли (в атмосфере и океане) участвуют следующие механизмы: межширотного теплообмена (меридионального переноса тепла от экваториальной области к полярным районам — «тепловая машина первого рода»); теплообмена в системе «океан — материк», связанного с реверсивной сезонной сменой областей холода и тепла («тепловая машина второго рода»); теплообмена в системе «океан — атмосфера»; межполушарного теплообмена и др. [13, 21]. Важным фактором в регулировании термического режима Земли является состав атмосферы (прежде всего, содержание  $H_2O$ ), определяющий величину альбедо (отражения приходящей от Солнца коротковолновой радиации), роль парникового эффекта планеты и его изменение [8, 9].

В XX в. отмечена тенденция повышения глобальной приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и темпера-

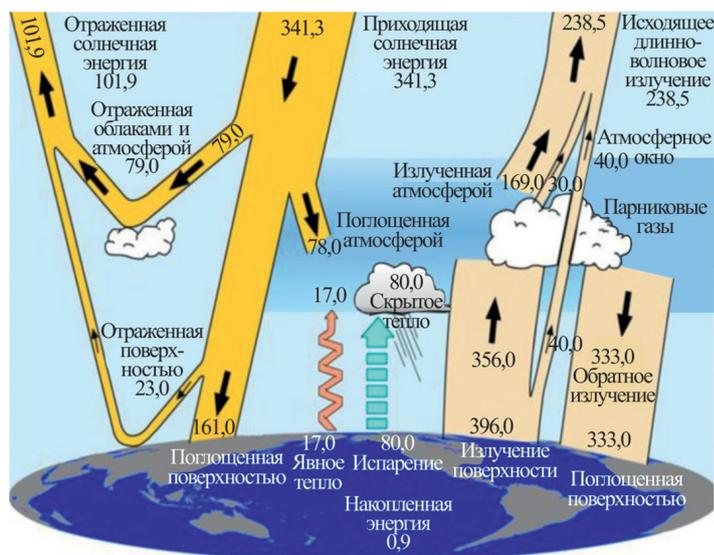


Рис. 1. Составляющие радиационного баланса Земли ( $Вт/м^2$ ) [30]

Fig. 1. Components of the Earth's radiation balance ( $W/m^2$ ) [30]

туры поверхности океана (ТПО), однако причины этого однозначно не определены. Широко распространено мнение о том, что основной причиной изменения глобального климата является парниковый эффект, связанный, главным образом, с эмиссией парниковых газов, определяемой антропогенным фактором [24]. В то же время не подвергается сомнению тот факт, что солнечная радиация имеет важнейшее значение в генезисе климата и в развитии и распространении жизни на Земле [5, 8–10, 13, 15, 21, 22].

На исследование причин изменения климата направлен ряд международных научных программ, например, координируемые Международным советом научных союзов (ICSU), ЮНЕСКО и Всемирной метеорологической организацией (WMO) Всемирная климатическая программа (WCP) и Всемирная программа исследования климата (WCRP). Повышенное внимание в настоящее время уделяется анализу изменений аномалии ПТВ в результате усиления парникового эффекта планеты, связанного с деятельностью человека. В то же время вопросы изменения ПТВ, ТПО и других характеристик климата и компонентов природной системы в связи с многолетними пространственными и временными вариациями инсоляции исследованы еще недостаточно.

Актуальность обозначенной темы определяется необходимостью прогно-

зирования изменений климата и связанных с ними последствий. Такой прогноз представляется важным для стратегического планирования социально-экономического развития нашей страны и регионов. Современное состояние климата (климат, согласно определению, — это статистический набор гидрометеорологических, почвенно-биологических и других показателей, усредненных по времени для отдельных районов или Земли в целом) вызывает озабоченность всего человечества. Беспокойство и тревога нашей цивилизации связаны, прежде всего, с наблюдаемыми неблагоприятными природными явлениями:

- сокращением площади морских льдов (особенно в Арктике);
- сокращением горных и полярных ледников;
- деградацией многолетнемерзлых пород;
- повышением уровня Мирового океана;
- изменением режима и интенсивности атмосферных осадков;
- дефицитом пресной воды;
- увеличением числа тайфунов и ураганов;
- увеличением засушливых периодов и масштабных природных пожаров;
- ростом неустойчивости в развитии природных процессов и увеличением числа климатических катастроф.

Эти природные явления создают риски для устойчивого социально-эко-

номического развития регионов и благополучия жизни людей.

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

Целью представленной работы является определение роли инсоляционного фактора в глобальных климатических событиях позднего голоцена и в многолетних изменениях (эволюции) современного глобального климата.

## Факторы глобального климата

### Солнечная радиация

Известно, что Солнце является основным источником энергии, определяющим радиационный и тепловой баланс Земли (рис. 1).

Солнце излучает энергию, которая обеспечивает Землю теплом и светом. Лучистая энергия Солнца является основным источником энергии гидрометеорологических, биохимических и многих других процессов, происходящих в атмосфере, гидросфере, биосфере, криосфере и в поверхностном слое литосферы, а также важнейшим фактором развития жизни на Земле, обеспечивающим необходимые термические условия и поддерживающим процесс фотосинтеза. Как отмечал А.И. Воейков, «Солнце — единственный источник тепла, достаточно сильный для того, чтобы оказывать значительное влияние на температуру поверхности земли и воздуха» [2, с. 39].

Годовой приход коротковолновой солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы или на поверхность Земли без учета атмосферы в среднем составляет  $5,49 \cdot 10^{24}$  Дж (или  $1367 \text{ Вт/м}^2$ )<sup>1</sup>, что превосходит все мировые запасы невозобновляемых энергоресурсов. Этот

<sup>1</sup> Значение  $341 \text{ Вт/м}^2$  (рис. 1) на входе (на верхней границе атмосферы или на поверхности Земли без учета атмосферы) получается делением значения солнечной постоянной (для рис. 1 —  $1364 \text{ Вт/м}^2$ ) на 4, поскольку солнечная постоянная — это лучистая энергия, приходящая на единицу площади диска Земли (при расстоянии в 1 а.е.). Площадь же сферы в 4 раза больше площади ее большого круга.

приход во времени не является постоянным, он подвержен межгодовым и многолетним изменениям, связанным как с изменением активности Солнца, так и с изменением орбитальных характеристик Земли и наклона оси ее вращения, влияющих на облучение. Также варьирует распределение приходящей солнечной радиации по широтам и сезонам.

### Парниковый эффект

Парниковый эффект удерживает тепло, получаемое нашей планетой от Солнца. При этом известно, что основным парниковым газом является водяной пар. Его содержание в среднем составляет около 2% и может достигать 4% в единице объема воздуха. Содержание двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>) всего 0,04% (или 400 ppm — миллионных частей в единице объема воздуха), при этом менее 1% от данного количества приходится на двуокись углерода, связанную с деятельностью человека. Водяной пар удерживает приблизительно 76% длинноволновой радиации, CO<sub>2</sub> — 4% [3]. Это суммарно двуокись углерода и природного, и антропогенного происхождения. Поскольку CO<sub>2</sub> антропогенного генезиса составляет около 1% от всего содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере, то по содержанию и удержанию тепла водяной пар на три порядка превосходит парниковые возможности CO<sub>2</sub>, связанного с деятельностью человека. Содержание другого парникового газа — метана — составляет всего несколько миллиардных частей в единице объема воздуха (0,00018%).

Действительно, Земля — планета водная. Мировой океан занимает 2/3 ее площади и является основным источником водяного пара в атмосфере. В горных и полярных районах Земли развиты ледники, а в Северном Ледовитом и Южном океанах распространены морские льды. На нашей планете существуют две гигантские ледниковые шапки (Антарктида и Гренландия), представляющие собой образования из H<sub>2</sub>O, находящейся в твердой фазе. На снимках из космоса видно, что Земля покрыта облаками, состоящими в основном из водяного пара. В зимние полугодия значительная часть земной поверхности в обоих полушариях покрывается снегом, а водные объекты — льдом. Вода присутствует на Земле в трех фазовых состояниях. Переход из одного состояния в другое сопровождается процессами выделения или погло-

щения тепла. Таким образом, роль воды, льда и водяного пара в природной системе Земли (с учетом известного гидрологического цикла — круговорот воды в природе) в процессах теплообмена и климатообразования несопоставима с ролью CO<sub>2</sub>, образующегося в результате деятельности человека. Содержание других парниковых газов (метан и пр.) еще на три порядка меньше, чем содержание двуокиси углерода (суммарно естественного и антропогенного происхождения). Климат — это обобщенная характеристика состояния природной среды, и он тесно связан с присутствием и круговоротом в природе H<sub>2</sub>O, являющейся важнейшим компонентом окружающей среды [7, 8].

При отсутствии солнечного излучения температура на Земле была бы близка к температуре окружающего ее пространства — к абсолютному нулю или –273°C. В настоящее время среднегодовая приповерхностная температура Земли составляет около +15°C. В случае отсутствия у нашей планеты атмосферы (при существующем притоке лучистой энергии) ее температура была бы ниже существующей приблизительно на 39° [10] и составила бы –24°C (это теплее, чем в Антарктиде, но холоднее, чем в Арктике).

Таким образом, температурный режим Земли, в основном, определяется двумя природными факторами: **приходящей от Солнца радиацией** и **парниковым эффектом планеты** (при этом главным парниковым газом является водяной пар). Учитывая, что температура окружающего Землю пространства составляет –273°C и среднегодовая приповерхностная температура Земли около +15°C, приходящей от Солнца радиацией определяется приблизительно 86% тепла (249°), а парниковым эффектом планеты — 14% (39°). Можно предположить, что отмечаемые в современную эпоху в природной системе Земли изменения обусловлены, прежде всего, изменением отмеченных факторов формирования климата (солнечной радиации и парникового эффекта планеты, связанного, главным образом, с содержанием водяного пара в атмосфере).

### Результаты и их обсуждение

Инсоляция Земли (удельная энергия облучения, Дж/м<sup>2</sup> и интенсивность облучения, Вт/м<sup>2</sup>) рассчитывалась с большим пространственным и временным разре-

шением. Расчеты выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид (DE-406, NASA) [29] для всей поверхности Земли (без учета атмосферы) в интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. (от позднего голоцена до настоящего времени и на 979 лет в будущее от 2020 г.). Исходными астрономическими данными для расчетов инсоляции были: склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего координатного времени (СТ) и всемирного корректируемого времени (УТ). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом Geodetic Reference System 1980 (GRS80) с длинами полуосей, равными 6 378 137 м (большие) и 6 356 752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением:

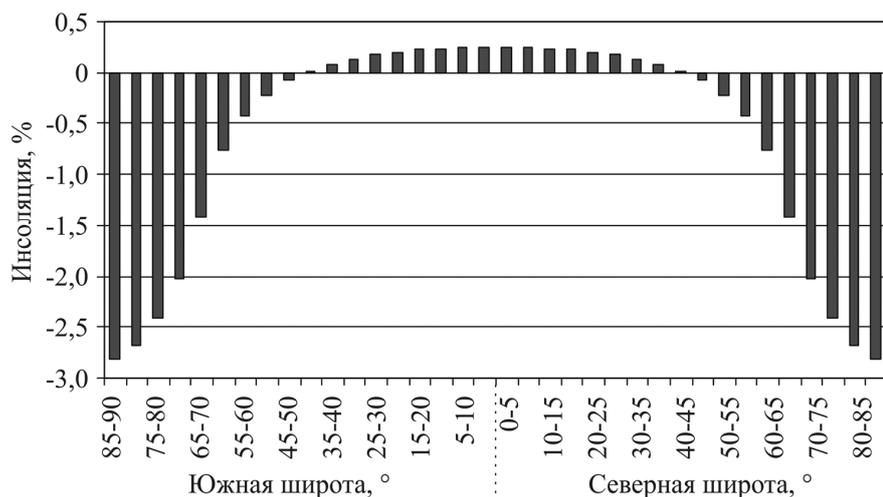
$$I_{mm}(\varphi_1, \varphi_2) = \int_{t_1}^{t_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(\varphi) \left( \int_{-\pi}^{\pi} \Lambda(t, \varphi, \alpha) d\alpha \right) d\varphi dt, \quad (1)$$

где  $I$  — приходящая солнечная радиация за элементарный  $n$ -ый фрагмент  $m$ -го тропического года (Дж);  $\sigma$  — площадной множитель (м<sup>2</sup>), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал  $\sigma(\varphi)d\alpha d\varphi$  — площадь бесконечно малой трапеции — ячейки эллипсоида;  $\alpha$  — часовой угол;  $\varphi_1, \varphi_2$  — географические широты, выраженные в радианах;  $\Lambda(t, \varphi, \alpha)$  — солнечная радиация в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида (Вт/м<sup>2</sup>),  $t$  — время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1°, по широте 1°, по времени 1/360 часть продолжительности тропического года с учетом ее изменения. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным 1361 Вт/м<sup>2</sup> [25]. Изменение активности Солнца не учитывалось [15, 20, 23].

Годовое поступление к Земле солнечной радиации за 5999 лет сокращается всего на 0,005%. Однако отмечается увеличение инсоляции в экваториальной области (0,25%) и сокращение в полярных районах (2,73%) — тенденция усиления широтной контрастности в солянном климате (рис. 2) [15].

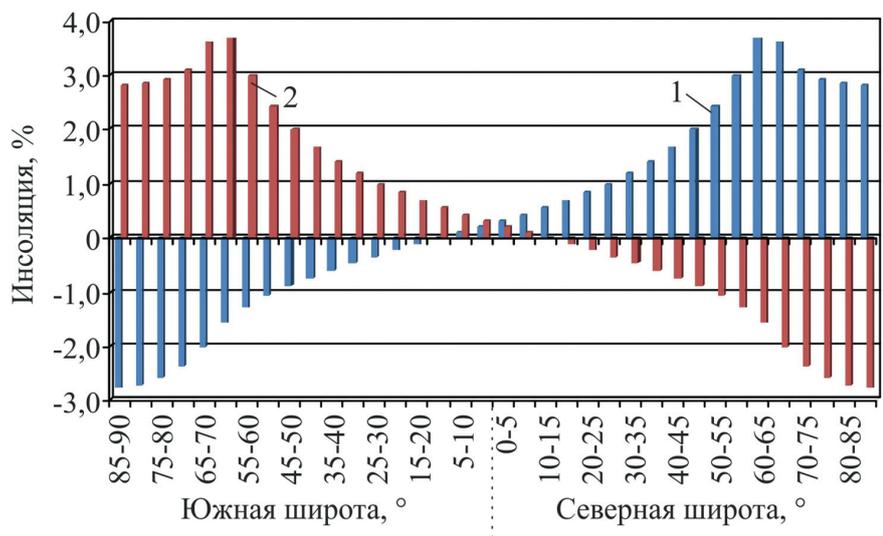
Отмечается сокращение инсоляции в летние для полушарий полугодия (2,90%) и увеличение в зимние (3,75%) — проявляется тенденция сглаживания сезонных различий в солянном климате Земли (рис. 3).

Из-за неравномерности в распределении солнечной радиации по земной поверхности возникает меридиональ-



**Рис. 2.** Изменение годовой инсоляции Земли в широтных зонах с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. в процентах от 3000 г. до н.э.

Fig. 2. Change in the annual insolation of the Earth in latitudinal zones from 3000 BC to 2999 AD as a percentage of 3000 BC



**Рис. 3.** Изменение полугодовой инсоляции Земли в широтных зонах с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. в процентах от 3000 г. до н.э. Обозначения: 1 — зимнее, 2 — летнее полугодие для Северного полушария

Fig. 3. Changes in the semi-annual insolation of the Earth in latitudinal zones from 3000 BC to 2999 AD as a percentage of 3000 BC. Designations: 1 — winter semester, 2 — summer semester for the Northern Hemisphere

ный градиент инсоляции (МГИ) [15, 16, 24]. На основе выполненных расчетов получен широтный профиль изменения годового МГИ за 5999 лет (рис. 4). Максимумы увеличения МГИ локализованы вблизи полярных кругов (60–70° широты — годовые зоны неустойчивости или турбулентности). Отмеченные зоны неустойчивости совпадают с районами максимального развития внетропических циклонов (циклогенеза) в полушариях. Увеличение годового МГИ также приходится на области локализации циркуляционных ячеек Хэдли и Ферре-

ля в атмосфере, уменьшение — в областях локализации полярных ячеек.

Определены многолетние изменения МГИ для зимнего и летнего (в Северном полушарии) полугодия (рис. 5). Значения сезонного МГИ максимально увеличиваются в зимнее (для Северного полушария) полугодие в широтной зоне 15–20° ю.ш. (11,8%) и максимально сокращаются в зоне 10–15° ю.ш. (17,8%). В летнее (для Северного полушария) полугодие максимальное увеличение (11,8%) отмечается в широтной зоне 10–15° с.ш., максимальное со-

кращение (17,8%) — в широтной зоне 5–10° с.ш.

Таким образом, в летних полугодиях в полушариях выделяются сезонные зоны неустойчивости, расположенные в широтном диапазоне 5–20° широты. Здесь в соседних пятиградусных широтных зонах отмечаются максимальные расхождения в тенденциях изменения летнего МГИ. Сезонные зоны неустойчивости совпадают с областями генерации тропических циклонов, 80% которых формируется в пределах диапазона 10–20° широты. С вихревым переносом энергии связана работа «тепловой машины первого рода» — механизма меридионального переноса тепла из низких широт в высокие [17]. В полярных областях (полярные циркуляционные ячейки) в зимние полугодия в полушариях отмечается увеличение сезонного МГИ, а в летние полугодия — его сокращение.

Приблизительно 87% тропических циклонов формируются в районах, расположенных не выше 20° широты (рис. 6). Таким образом, области генерации тропических циклонов, наносящих огромный ущерб природе и человечеству (например, ущерб от урагана «Катрина» в 2005 г. составил более 100 млрд долл. США, ущерб от ураганов «Харви» и «Ирма» в 2017 г. оценивается в 290 млрд долл. США), совпадают с сезонными зонами неустойчивости (турбулентности) в переносе энергии.

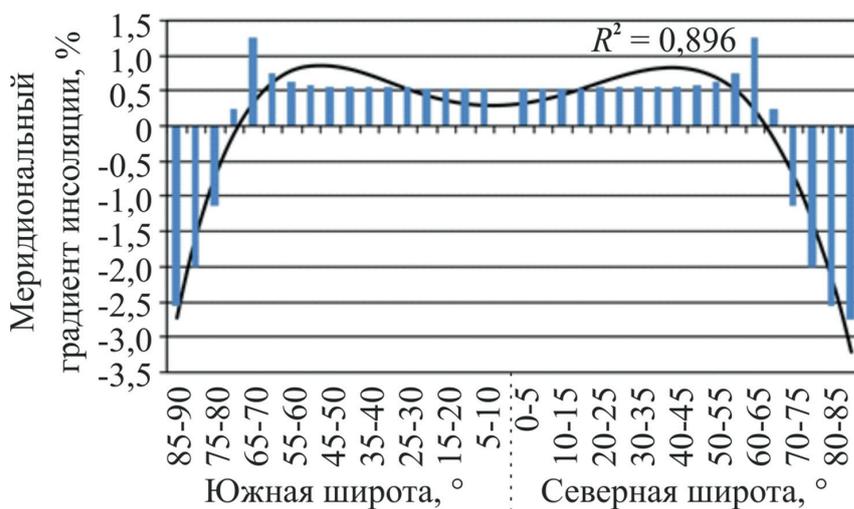
Отмеченные области вблизи 65° и 10–15° широты характеризуют разные стадии развития циклонических вихрей. Если с сезонными зонами неустойчивости связано зарождение тропических циклонов (вблизи 10–15° широты в каждом полушарии), то к годовым зонам неустойчивости (вблизи 65° в каждом полушарии) приурочены области максимального развития внетропических циклонов [12]. Вихри (циклоны) переносят энергию в атмосфере из области источника тепла (из низких широт) в области его стока (в высокие широты). Известно, что мощность энергии, выделяемой в тропическом циклоне среднего размера, составляет около  $10^{15}$  Вт (ПВт). Это значительно превосходит мощность всей потребляемой человечеством энергии за год (например, в 2008 г. —  $1510^{12}$  Вт или 15 ТВт). Ежегодно в Северном полушарии насчитывается от 60 до 70 тропических циклонов, в Южном (из-за большей однородности подстилающей поверхности) — всего 5–10.

С усилением отмеченных зон неустойчивости (турбулентности) связано наблюдаемое **увеличение числа ураганов и тайфунов, внетропических циклонов, рост неустойчивости природных процессов и увеличение числа климатических катастроф.**

Полученное среднее распределение годового МГИ сравнивалось с меридиональным распределением среднего годового переноса энергии в системе «океан — атмосфера», приведенным в работах Э.Н. Лоренца [6], Э. Пальмена и Ч. Ньютона [11]. Коэффициент корреляции между средними значениями годового МГИ и значениями переноса энергии в системе «океан — атмосфера» составил 0,980 (линейная связь). При этом численные значения переноса энергии в системе «океан — атмосфера» в работах [6, 11] в среднем в 6–7 раз превосходят значения МГИ, что может быть связано с участием в переносе энергии в системе «океан — атмосфера» водных и воздушных масс. В других работах значения переноса энергии приблизительно в 3–5 раз превышают значения годового МГИ [28, 30].

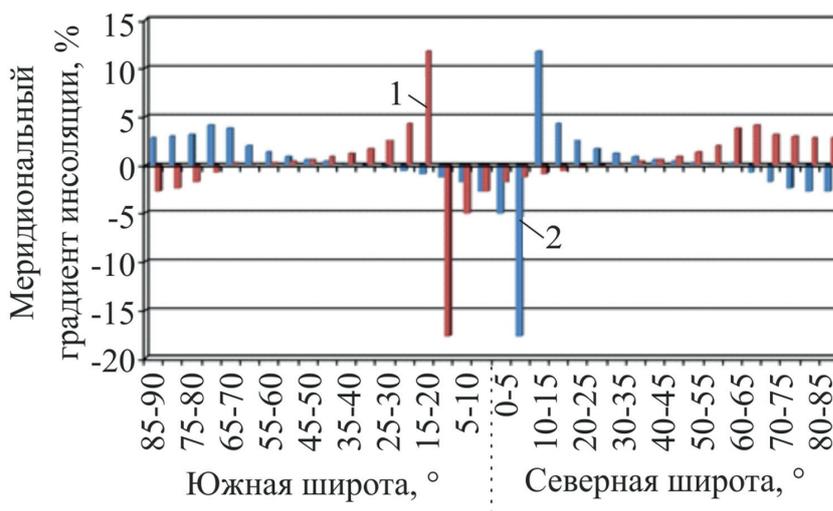
Поскольку перенос энергии в системе «океан — атмосфера» определяется МГИ, то и полученные для него особенности могут проявляться в этой системе «океан — атмосфера» (возрастание или ослабление интенсивности циркуляции в ячейках общей циркуляции атмосферы, усиление меридионального вихревого переноса энергии и климатической изменчивости). Отмечаемые для современной эпохи особенности солнечного климата Земли (усиление широтной контрастности и сглаживание сезонных различий, особенности изменения МГИ) связаны с уменьшением наклона оси вращения Земли [15, 23].

В результате корреляционного анализа определена связь многолетних изменений аномалии ПТВ и ТПО Земли и полушарий [15] с многолетними изменениями годовой инсоляционной контрастности (ИК). Для полушарий ИК рассчитывалась (по полученным значениям инсоляции) как разность солнечной радиации, приходящей в широтную область 0–45° (источник тепла) и 45–90° (сток тепла) за год. Для Земли в качестве ИК принималось среднее годовое значение ИК, полученное для полушарий [5, 6]. Инсоляционная контрастность, таким образом, обобщенно (по областям источника и стока тепла) отражает изменения МГИ. Многолет-



**Рис. 4. Изменение годового МГИ за 5999 лет (аппроксимация — полином четвертой степени) в процентах от 3000 г. до н.э.**

**Fig. 4. Change in the annual value of the interannual insolation gradient for 5999 years (approximation — a polynomial of the fourth degree) in percentage from 3000 BC**



**Рис. 5. Изменение МГИ за 5999 лет в процентах от 3000 г. до н.э. Обозначения: 1 — зимнее, 2 — летнее полугодие для Северного полушария**

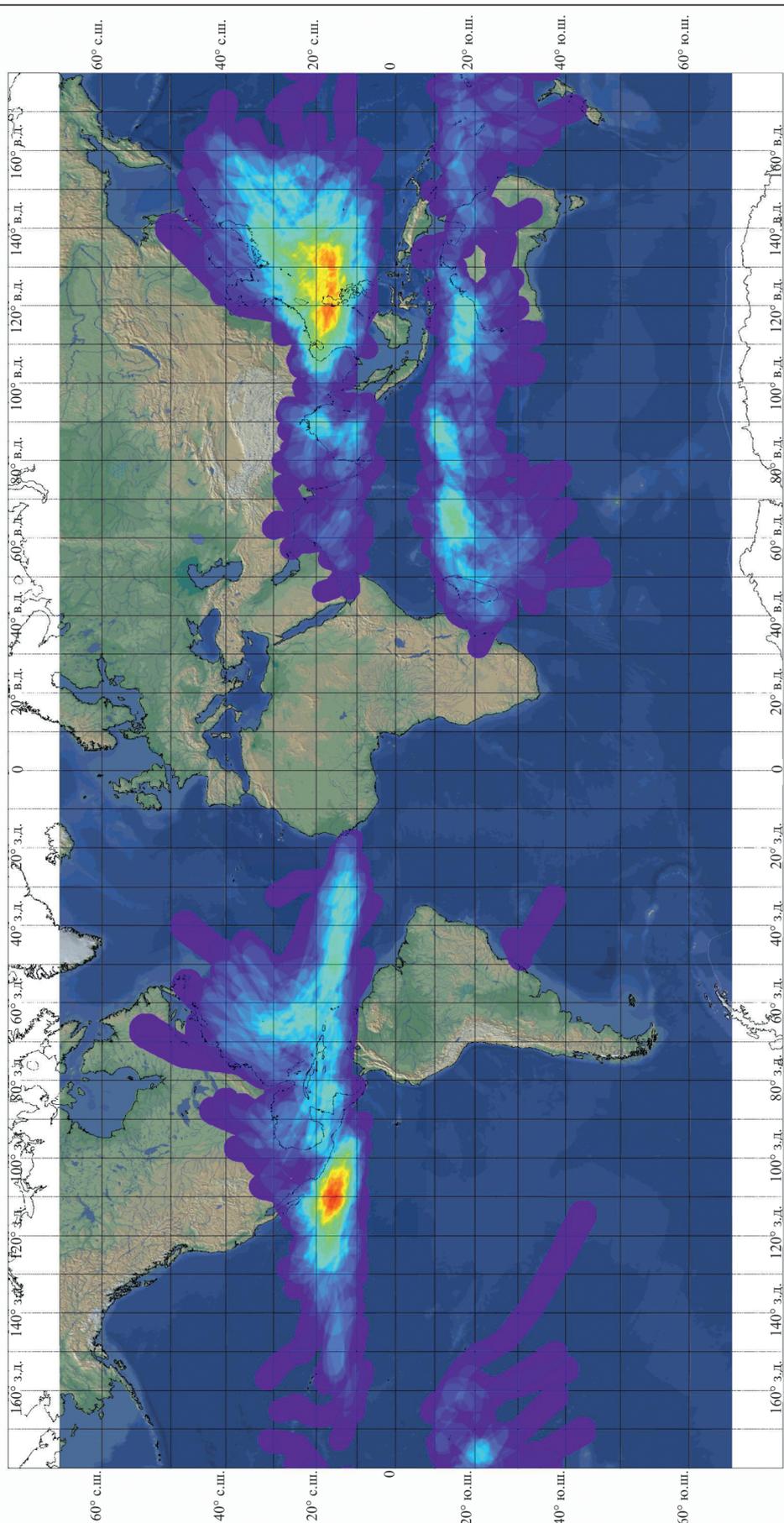
**Fig. 5. Change in interannual insolation gradient for 5999 years as a percentage from 3000 BC. Designations: 1 — winter semester, 2 — summer semester for the Northern Hemisphere**

ние изменения ИК линейно связаны с изменением угла наклона оси вращения Земли (коэффициент корреляции составляет — 0,998).

Изменения ТПО и ПТВ Земли и полушарий (данные Университета Восточной Англии и Центра Хэдли Метеорологического бюро за период с 1900 по 2016 гг.) в основном учитываются трендами [15]. Значения коэффициента детерминации составляют от 0,693 до 0,862 (тренды — полиномы второй степени). Коэффициент детерминации показывает долю изменений ПТВ и ТПО, определяемую трендом. Следовательно, чтобы объяснить тенденции много-

летних изменений (эволюцию) глобальной температуры, следует установить фактор, определяющий тренды в исходных рядах ПТВ и ТПО. Анализ показывает, что многолетние изменения ТПО и ПТВ Земли и полушарий, а также продолжительность групп циркуляции в атмосфере [19] характеризуются тесными положительными корреляционными связями с многолетними изменениями ИК и отрицательными с многолетними изменениями угла наклона оси. Угол наклона оси вращения за период с 1900 по 2016 гг. уменьшился на 0,015°. Инсоляционная контрастность за этот период увеличилась на

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
 ФГБУ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ «ПЛАНЕТА»»



Число случаев  
 1 3 5 6 8 10 11 13 15 17 18 20 22 23 25 27 28 30 32 34  
 Диаметр центрального облачного массива  
 600 км  
 Проекция Меркагора  
 Стандартная параллель 45°

Глобальная карта повторяемости тропических циклонов  
 за 2007-2011 гг.



ФГБУ «НИЦ «ПЛАНЕТА»  
 Россия, 123242, Москва  
 Б. Предтеченский пер., 7  
 Тел.: (499) 2523717  
 Факс: (499) 2526610  
 e-mail: [asmus@planet.iitp.ru](mailto:asmus@planet.iitp.ru)  
<http://planet.iitp.ru>  
<http://planet.rssi.ru>

Рис. 6. Карта повторяемости тропических циклонов [30]  
 Fig. 6. Map of the frequency of tropical cyclones [30]

**Многолетние изменения ПТВ и ТПО, объясняемые регрессионной моделью [15]**  
**Long-term changes in surface air temperature and sea surface temperature explained by the regression model [15]**

Факторы	Земля / Мировой океан	Северное полушарие	Южное полушарие
Приповерхностная температура воздуха (ПТВ)			
ИК	80,7%	73,4%	83,1%
ИК и КМО	88,3%	86,4%	84,0%
Температура поверхности океана (ТПО)			
ИК	79,7%	69,3%	84,1%
ИК и КМО	88,5%	86,6%	85,9%

Примечание: КМО — климатическая мультидекадная осцилляция с периодом около 60 лет.

0,7 Вт/м<sup>2</sup>. Значения ПТВ и ТПО возросли приблизительно на 1,0 и 0,9°C соответственно. Выполненные по уравнению регрессии (по ансамблю линейных и полиномиальных решений) расчеты показали, что многолетние изменения ПТВ и ТПО в основном связаны с многолетними изменениями годовой инсоляционной контрастности (табл.).

Также многолетними изменениями ИК в регрессионной модели объясняется:

- более 90,0% многолетних изменений уровня Мирового океана [15];
- 76,0% изменения среднегодовой площади морских льдов в Северном полушарии, 76,0% минимальной площади морских льдов и 74,2% сезонной амплитуды их площади [14];
- 95,1% многолетних изменений среднегодовой площади морских льдов, 93,2% максимальной площади и 89,2% минимальной площади морских льдов в Северном Ледовитом океане [17].
- в среднем 95,9% многолетних изменений суммарного баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария.

Таким образом, определены естественные причины изменения (эволюции) современного глобального климата. Основной из них является изменение наклона оси вращения Земли, регулирующее распределение приходящей к нашей планете солнечной радиации по широтам и сезонам, а также интенсивность меридионального теплообмена (работы «тепловой машины первого рода») [1, 15, 21].

Физический механизм найденной автором тесной корреляционной связи многолетних изменений ПТВ, ТПО, площади морских льдов в Северном полушарии и суммарного баланса массы горных ледников в ледниковых районах с инсоляционной контрастностью в об-



**Рис. 7. Принципиальная схема радиационного теплообмена в атмосфере**  
 Fig. 7. Schematic diagram of radiation heat exchange in the atmosphere

общенном виде может сводиться к следующему. Связанное с уменьшением угла наклона увеличение ИК, управляющее меридиональным переносом тепла или интенсивностью работы «тепловой машины первого рода», приводит к увеличению переноса тепла (циркуляционными процессами в атмосфере и вихревыми образованиями) из низких широт в высокие. Следует учесть, что площади областей стока тепла в полушариях приблизительно в 2,7 раза меньше площади областей его источников. Поэтому переносимое из низких широт в высокие радиационное тепло распределяется по меньшей площади, и его удельные характеристики возрастают. В результате меридионального переноса тепла ТПО

и ПТВ в областях стока тепла увеличиваются (явное тепло). Это приводит к увеличению испарения, повышению содержания водяного пара в атмосфере и усилению парникового эффекта. В результате происходит дополнительный рост температуры и т.д. (по спирали). Этот процесс, постоянно повторяясь, усиливает потепление климата в Северном полушарии и приводит к сокращению площади морских льдов, горных ледников и деградации мерзлоты. Кроме того, в результате конденсации из-за адвекции теплых воздушных масс в высокие широты выделяется скрытое тепло, которое вносит дополнительный вклад в схему радиационного теплообмена в атмосфере (рис. 7).

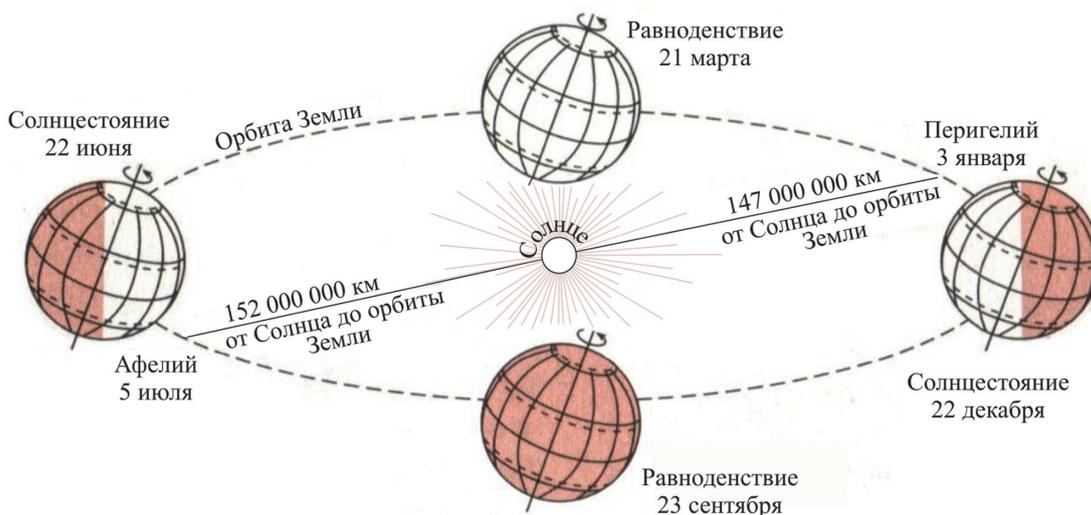


Рис. 8. Орбитальное движение Земли [16]

Fig. 8. Orbital motion of the Earth [16]

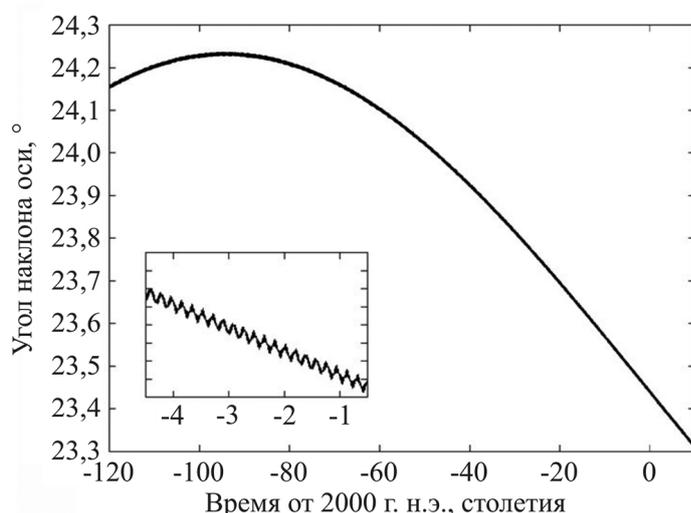


Рис. 9. Изменение наклона оси вращения Земли [22]

Fig. 9. Changing in the tilt of the Earth's rotation axis [22]

Три нижних блока в схеме отражают механизм усиления процесса глобального потепления климата. Также следует учитывать положительные обратные связи — уменьшение альбедо из-за многолетнего сокращения площади морских льдов и усиление парникового эффекта из-за дегазации многолетнемерзлых пород в связи с потеплением климата.

Этим механизмом определяется повышение глобальной температуры (ПТВ и ТПО), **сокращение горных ледников и площади распространения морских льдов, деградация мерзлоты, повышение уровня Мирового океана, увеличение аридных площадей и засухливых периодов.**

Следует отметить, что из-за различий в полушариях (Северное полушарие более континентальное, Южное более океаническое) эволюция климата в них несколько отличается. Так, во-первых, вихревых образований (тропических и внетропических циклонов) в Северном полушарии больше, чем в Южном, в котором подстилающая поверхность более однородна. Во-вторых, в Южном полушарии меридиональный перенос тепла заметно блокируется зональной циркуляцией («ревущие сороковые» в атмосфере и циркумантарктическое течение в океане). Поэтому процессы потепления более заметно проявляются в Северном полушарии.

### Изменение глобального климата Земли в позднем голоцене

Прогнозируемые изменения климата в будущем и знания о них во многом определяются климатическими вариациями в прошлом и информацией о причинах таких изменений, которой на данный момент располагают ученые. Также по наблюдаемым изменениям современного климата и информации об их причинах можно выполнять палеоклиматические реконструкции и объяснять причины глобальных климатических событий, например, в ближайшем прошлом.

Из-за того, что ось вращения Земли имеет наклон (в настоящее время около  $23,5^\circ$ ) отмечаются сезонные изменения состояния природной среды, называемые временами года. Из-за наклона оси в летнее полугодие полушарие получает приблизительно в два раза больше (зимняя инсоляция составляет 46% от летней) солнечной радиации, чем в зимнее. Из-за эллиптичности орбиты (рис. 8) Земля в первое полугодие получает приблизительно на 7% меньше солнечной радиации, чем во второе. Для сравнения амплитуда солнечной активности в 11-тилетнем цикле составляет всего 0,07%. Однако наклон оси вращения меняется на  $2^\circ 37'$  (это 11,10% от  $23,5^\circ$ ) с периодом около 40 тыс. лет. С изменением наклона оси линейно связано изменение годовой ИК, обобщенно отражающей изменение меридионального градиента инсоляции [15].

Глобальное потепление климата (это начало современной геологической

эпохи — голоцена) началось около 10–12 тыс. лет назад и связано с наступлением фазы уменьшения наклона оси вращения Земли (рис. 9). Лето в Северном полушарии в это время также приходилось на положение Земли вблизи перигелия орбиты (сейчас лето в Северном полушарии приходится на положение Земли вблизи афелия) (рис. 8). Соединение перигелия орбиты с точкой летнего солнцестояния произошло 11,7 тыс. лет назад.

С этого времени происходит деградация и исчезновение последнего покровного оледенения в Европе, Западной Сибири и Северной Америки. Процесс потепления глобального климата не был равномерным. Он характеризовался этапами усиления (голоценовый оптимум, малый или средневековый оптимум голоцена) и ослабления (в позднем голоцене — малый ледниковый период). В настоящее время отмечается этап усиления глобального потепления климата и его неустойчивости (турбулентности).

Выполненные автором расчеты показывают, что годовая ИК в полушариях на протяжении всего времени от 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. возрастает (рис. 10, 11). Увеличение значений годовой ИК определяет термические условия межледниковья для современной геологической эпохи (голоцена) [15].

Большие значения ИК в Южном полушарии связаны с тем, что здесь в летнее полугодие (когда приход солнечной радиации в полушарии максимальный) Земля (за исследуемый период с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э.) проходит перигелий своей орбиты. В летнее полугодие Северного полушария Земля проходит афелий (см. рис. 8). Необходимо вновь отметить, что годовая ИК полушарий и Земли линейно связана с многолетними изменениями угла наклона оси вращения [15].

На фоне работы приведенного выше механизма, связанного с изменением годовой ИК в полушариях, определяющей межледниковый характер современной геологической эпохи (глобальное потепление), похолодания или усиления потепления связаны с другими характеристиками инсоляции. Рассчитанные автором на 5000 лет в прошлое и на 999 лет в будущее (от 2000 г.) характеристики инсоляции позволили определить возможные причины таких глобальных климатических событий в позднем голоцене, как малый (средне-

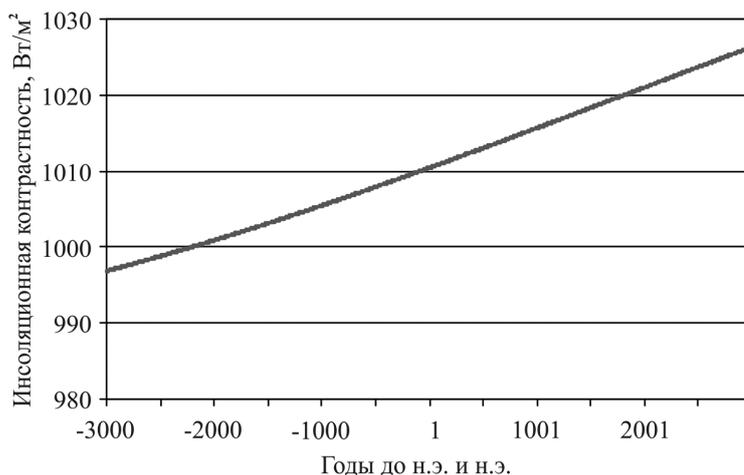


Рис. 10. Многолетние изменения годовой ИК в Северном полушарии с 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э.

Fig. 10. Long-term changes in the annual insolation contrast in the Northern Hemisphere from 3000 BC to 2999 AD

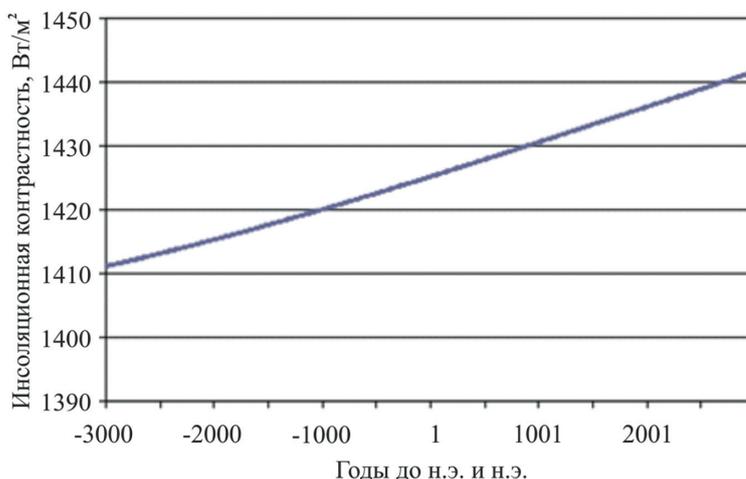


Рис. 11. Многолетние изменения годовой ИК в Южном полушарии с 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э.

Fig. 11. Long-term changes in the annual insolation contrast in the Southern Hemisphere from 3000 BC to 2999 AD

вековой) оптимум и малый ледниковый период.

Для этого автором рассчитывались сезонные значения ИК для полушарий, изменения которых связаны с наклоном оси и прецессией. Расчеты ИК выполнялись с учетом сезонного смещения областей источника 0–40° и стока 40–90° тепла для зимнего в полушарии астрономического полугодия и областей источника 0–60° и стока 60–90° тепла для летнего в полушарии астрономического полугодия. Из полученных результатов следует, что максимум зимней ИК в Северном полушарии синхронизируется с малым (средневековым) оптимумом голоцена (рис. 12).

Зимняя ИК в Северном полушарии в 3000 г. до н.э. составляла 1863,72 Вт/м<sup>2</sup>,

в 1023 г. н.э. (максимум зимней ИК в полушарии) — 1891,62 Вт/м<sup>2</sup>, в настоящее время (2020 г. н.э.) — 1889,60 Вт/м<sup>2</sup>. Максимальное значение зимней ИК в Северном полушарии превышает значение ИК в 3000 г. до н.э. на 27,90 Вт/м<sup>2</sup> и современное значение на 2,02 Вт/м<sup>2</sup>. Таким образом, вероятно, что одним из факторов малого (средневекового) климатического оптимума является максимум зимней ИК в Северном полушарии. Значит, малый (средневековый) климатический оптимум связан, прежде всего, с зимним потеплением в Северном полушарии из-за максимума в меридиональном переносе тепла [18].

Возможна и вторая причина средневекового климатического оптимума, связанная с соляными факторами. При

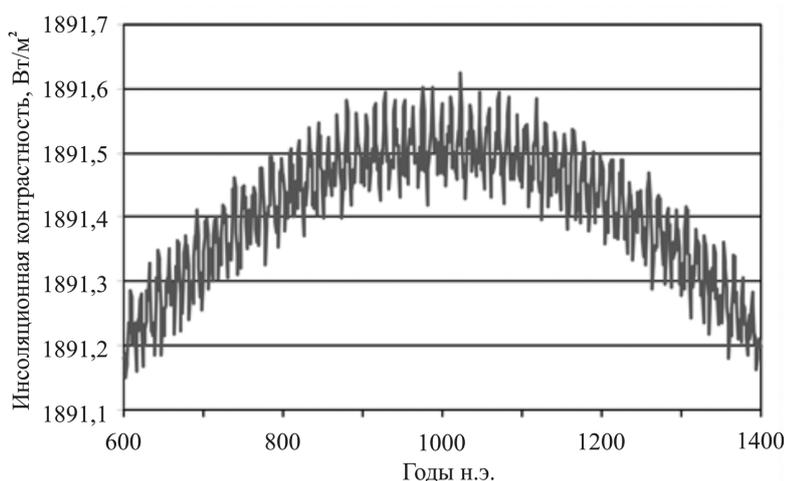


Рис. 12. Максимум зимней ИК в Северном полушарии

Fig. 12. Maximum winter insolation contrast in the Northern Hemisphere

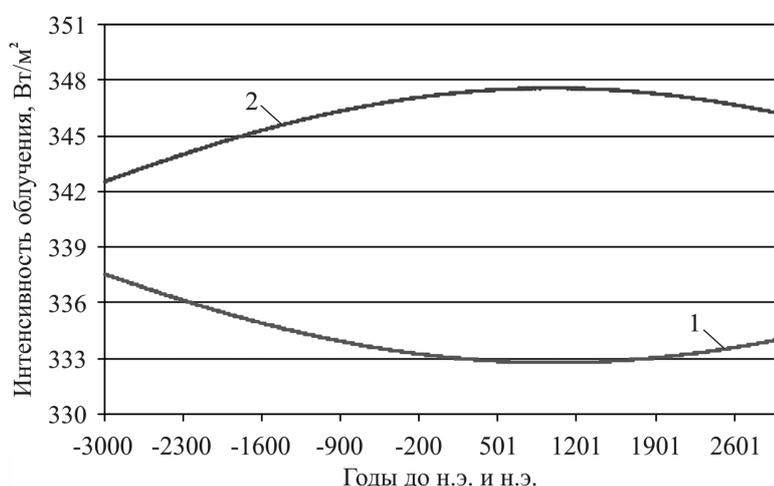


Рис. 13. Многолетние изменения инсоляции Земли. Обозначения: 1 — первое (летнее в Северном полушарии), 2 — второе (зимнее в Северном полушарии) астрономическое полугодие

Fig. 13. Long-term changes in the Earth's insolation. Designations: 1 — first (summer in the Northern Hemisphere), 2 — second (winter in the Northern Hemisphere) astronomical semester

движении в первое астрономическое полугодие от точки весеннего равноденствия к точке осеннего равноденствия (в Северном полушарии в это время — лето, в южном — зима) Земля получает меньше солнечной радиации, чем во второе полугодие при движении от точки осеннего равноденствия к точке весеннего равноденствия (см. рис. 8). Вблизи XI в. н.э. отмечается максимальное различие в инсоляции Земли по полугодиям (рис. 13). Самая большая разность инсоляции Земли в первое и второе астрономическое полугодия составляет около  $14 \text{ Вт/м}^2$ . В Южном полушарии в это время (второе астрономическое полугодие) — лето и происходит усиление межполушарного теплообмена. Из Южного полушария в

летнее полугодие радиационное тепло переносится в Северное полушарие в зимнее полугодие (и, как отмечалось, в Северном полушарии происходит усиление зимней ИК и меридионального переноса тепла) (см. рис. 12).

Сезонный воздухообмен в полушариях впервые описан в работе Н. Шоу (N. Shaw). Оценки перемещаемой массы воздуха в Северном полушарии получены Н.С. Сидоренковым (для 1970–1974 гг.). В среднем из летнего полугодия полушария в зимнее переносится около  $4 \cdot 10^{18} \text{ г}$  воздуха [13]. Межполушарный обмен составляет, таким образом, около 0,08% от массы атмосферы. Однако, как следует из рис. 13, соотношение в переносе воздуха из летнего полугодия полушария в зимнее может ме-

няться (в связи с различием летней и зимней инсоляции в полушариях). Тогда в период зимнего полугодия одно полушарие в результате межполушарного теплообмена может получать больше (или меньше) тепла, чем другое [18].

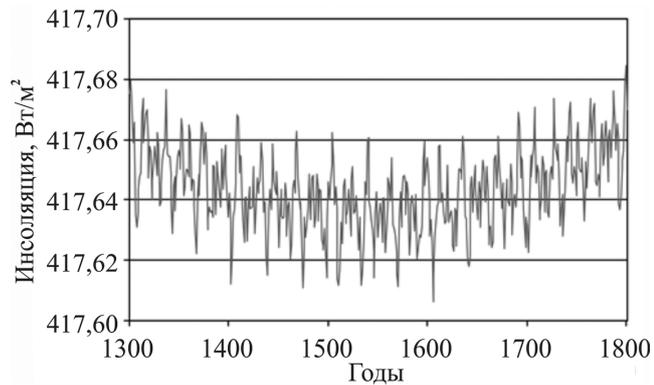
Отмеченные изменения в термическом режиме, определяемые вариациями сезонной ИК и инсоляции, а также механизмом полушарного теплообмена, происходят на фоне усиления меридионального переноса тепла (годовая ИК), связанного с уменьшением наклона оси (началось около 10 тыс. лет назад), которым определяется общая термическая характеристика современной геологической эпохи — межледниковье. На фоне усиления годового меридионального градиента инсоляции (и годовой ИК) отмечается и минимум летней инсоляции в Северном полушарии (в середине XVI в.), с которым (а также с минимумами солнечной активности) связан малый ледниковый период (рис. 14). Таким образом, определяется роль соларных факторов в глобальных климатических событиях позднего голоцена.

Размах изменения летней инсоляции Северного полушария на всем интервале составляет  $7,70 \text{ Вт/м}^2$  или 1,84% от среднего значения. В пределах отмечаемых хронологических границ малого ледникового периода выделяются три минимума солнечной активности: минимум Шперера (1460–1540 или 1420–1530 гг. н.э.), минимум Маундера (1645–1715 гг. н.э.) и минимум Дальтона (1790–1830 гг. н.э.). Наиболее глубоким, хотя и не очень продолжительным, был минимум Маундера. Сокращение солнечной радиации в этот период составляло около  $0,50\text{--}0,70 \text{ Вт/м}^2$  относительно современного уровня [15, 27].

Известно, что летняя инсоляция имеет важное значение в генезисе климата и его изменениях. Это определяется, во-первых, тем, что при увеличении летней инсоляции увеличивается температура, а также испарение и содержание водяного пара в атмосфере, что приводит к усилению парникового эффекта, во-вторых, выделением скрытого тепла от увеличения атмосферных осадков (переход водяного пара в воду и снег), наконец, в-третьих, уменьшением альбедо за счет сокращения площади морских льдов и ледников — нагревание поверхности (материков и океанов) и от нее атмосферы. При сокращении летней инсоляции, очевидно, происходят обратные эффекты. Максимальное сокращение летней инсоляции в минимуме (с экстремальны-

ми значениями в период с 1500 по 1550 гг. н.э.) относительно современного значения, по авторским расчетам, невелико —  $0,13 \text{ Вт/м}^2$ . Однако это был самый глубокий минимум летней инсоляции в Северном полушарии за последние 5000 лет. Относительно значения инсоляции в 3000 г. до н.э. в годы минимума (1300–1800 гг. н.э.) инсоляция была меньше на  $7,70 \text{ Вт/м}^2$ . Именно это, наряду с тремя перечисленными климатическими эффектами увеличения/уменьшения летней инсоляции, позволяет считать продолжительный и глубокий минимум летней инсоляции Северного полушария (с экстремальными значениями в 1500–1550 гг. н.э.) одной из причин малого ледникового периода.

По палеоботаническим и археологическим данным, а также историческим свидетельствам определяется, что температура во время оптимума голоцена (5–7 тыс. лет назад) в Западной Европе была на  $2\text{--}3^\circ\text{C}$  выше, чем в настоящее время [4, 9]. Средняя летняя температура в Европе и в Северной Америке в период малого (средневекового) оптимума (700–1300 гг. н.э.) более чем на  $1^\circ\text{C}$  превышала современную. Учитывая это, наблюдаемое в настоящее время глобальное потепление климата сложно признать уникальным и, тем более, связанным с антропогенным фактором. Выбросы парниковых газов — это проблема экологическая. Их радиационный эффект определяется ростом содержания водяного пара в атмосфере, которое является следствием увеличения испарения, связанного с повышением ПТВ (в соответствии с приведенным выше физическим механизмом). С увеличением ТПО уменьшается растворимость двуокси углерода в океанической воде. Поэтому отмечается увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере.



**Рис. 14. Локализация минимума летней интенсивности облучения Северного полушария в 1300–1800 гг. н.э.**

Fig. 14. Localization of the minimum of the summer irradiation intensity in the Northern Hemisphere in 1300–1800 AD

Таким образом, увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере является не причиной, а следствием повышения температуры поверхности океана. Изменения климата, как следует из исторической информации и полученных автором результатов, связаны с естественными факторами. В настоящее время это увеличение годового МГИ (ИК), определяющего усиление меридионального переноса тепла (см. рис. 10, 11) [11, 15, 16].

### Заключение

Глобальные климатические события в позднем голоцене (средневековый оптимум и малый ледниковый период) связаны с экстремумами инсоляционных характеристик. В настоящее время основным фактором изменения глобального климата является уменьшение наклона оси вращения Земли, определяющее усиление меридионального градиента инсоляции и меридионального переноса тепла как в циркуляционных ячейках, так и вихревыми образованиями. Характеристикой меридио-

нального градиента инсоляции является инсоляционная контрастность. С многолетними изменениями годовой ИК в настоящее время отмечается тесная корреляционная связь многолетних изменений глобальных ПТВ, ТПО, баланса массы льда в ледниковых районах, площади морских льдов в Северном полушарии, уровня Мирового океана [15]. Причины изменения глобального климата в позднем голоцене и в настоящее время могут быть основой долгосрочного прогноза климатических вариаций и связанных с ними последствий.

Инсоляционные характеристики теоретически рассчитываются в будущем на основе высокоточных астрономических эфемерид. Полученные в результате расчетов базы данных инсоляционных характеристик могут быть основой радиационного блока в физико-математических моделях климата [21] и тем самым способствовать совершенствованию климатических прогнозов, оценке возможных рисков и разработке мер по минимизации их последствий. 🌐

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Г.В., 2015. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике. *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 11–26.
2. Воейков А.И., 1903. *Метеорология: в четырех частях*. Картографическое заведение А. Ильина, Санкт-Петербург.
3. Галин В.Я., 1998. Параметризация радиационных процессов в атмосферной модели ИВМ РАН. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, Том 34, № 3, с. 380–389.
4. Гриббин Дж. (ред.), 1980. *Изменение климата*, пер. с англ. Э.К. Бютнер, В.А. Зубакова. Гидрометеиздат, Ленинград.
5. Кондратьев К.Я., 1992. *Глобальный климат*. Наука, Санкт-Петербург.
6. Лоренц Э.Н., 1970. *Природа и теория общей циркуляции атмосферы*, под ред. С.С. Зилитинкевича, пер. с англ. И.Л. Вулис. Гидрометеиздат, Ленинград.
7. Малинин В.Н., Гордеева С.М., 2015. Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным. *Исследование Земли из космоса*, № 1, с. 3–11, <https://doi.org/10.7868/S0205961415010042>.

8. Монин А.С., Берестов А.А., 2005. Новое о климате. Вестник Российской академии наук, Том 75, № 2, с. 126–138.
9. Монин А.С., Шишков Ю.А., 1979. История климата. Гидрометеиздат, Ленинград.
10. Монин А.С., Шишков Ю.А., 2000. Климат как проблема физики. Успехи физических наук, Том 170, № 4, с. 419–445, <https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200004d.0419>.
11. Пальмен Э., Ньютон Ч., 1973. Циркуляционные системы атмосферы, под ред. С.П. Хромова, пер. с англ. И.И. Шейниса. Гидрометеиздат, Ленинград.
12. Погосян Х.П., 1976. Циклоны. Гидрометеиздат, Ленинград.
13. Сидоренков Н.С., 2002. Атмосферные процессы и вращение Земли. Гидрометеиздат, Санкт-Петербург.
14. Федоров В.М., 2015. Тенденции изменения площади морских льдов в Северном полушарии и их причины. Криосфера Земли, Том XIX, № 3, с. 52–64.
15. Федоров В.М., 2018. Солнечная радиация и климат Земли. Физматлит, Москва.
16. Федоров В.М., 2019. Проблема меридионального переноса тепла в астрономической теории климата. Геофизические процессы и биосфера, Том 18, № 3, с. 117–128, <https://doi.org/10.21455/GPB2019.3-8>.
17. Федоров В.М., Гребенников П.Б., Фролов Д.М., 2020. Оценка роли инсоляционного фактора в изменениях площади морских льдов в Российской Арктике. Криосфера Земли, Том XXIV, № 3, с. 38–50, [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3\(38-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3(38-50)).
18. Федоров В.М., Гребенников П.Б., 2020. Малый (средневековый) климатический оптимум голоцена и его возможные причины. Жизнь Земли, Том 42, № 4, с. 395–405, [https://doi.org/10.29003/m1768.0514-7468.2020\\_42\\_4/395-405](https://doi.org/10.29003/m1768.0514-7468.2020_42_4/395-405).
19. Федоров В.М., Кононова Н.К., 2015. Солнечная радиация, приходящая на верхнюю границу атмосферы и изменчивость циркуляционных процессов в Северном полушарии. Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, № 576, с. 183–200.
20. Федоров В.М., Костин А.А., 2019. Вычисление инсоляции Земли для периода от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э. Процессы в геосредах, № 2(20), с. 254–262.
21. Шулейкин В.В., 1953. Физика моря, 3-е изд., перераб. и доп. Изд-во АН СССР, Москва.
22. Cionco R.G., Soon W.W.-H., 2017. Short-term orbital forcing: a quasi-review and a reappraisal of realistic boundary conditions for climate modeling. Earth-Science Reviews, Vol. 166, pp. 206–222, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.013>.
23. Fedorov V.M., 2019. Earth's insolation variation and its incorporation into physical and mathematical climate models. Physics-Uspekhi, No. 62(1), pp. 32–45, <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.12.038267>.
24. IPCC, 2013. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds), Chapter 8. Anthropogenic and natural radiative forcing. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 659–740.
25. Kopp G., Lean J.L., 2011. A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance. Geophysical Research Letters, Vol. 38, Issue 1, p. L01706, <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>.
26. Lean J., Rottman G., Harder J., Kopp G., 2005. SORCE contributions to new understanding of global change and solar variability. In G. Rottman, T. Woods, V. George (eds), The Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE). Springer, New York, NY, USA, pp. 27–53, [https://doi.org/10.1007/0-387-37625-9\\_3](https://doi.org/10.1007/0-387-37625-9_3).
27. Peixoto J.P., Oort A.H., 1984. Physics of climate. Reviews of Modern Physics, Vol. 56, No. 3, pp. 365–429, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.56.365>.
28. Standish E.M., 1998. JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405. Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memorandum No. 312.F-98-048. Publishing house of the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, La Cañada Flintridge, CA, USA.
29. Trenberth K.E., Caron J.M., 2001. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. Journal of Climate, Vol. 14, No. 16, pp. 3334–3343.
30. Trenberth K.E., Fasullo J.T., 2009. Changes in the flow of energy through the Earth's climate system. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 18, No. 4, pp. 369–377.
31. Официальный сайт ФГБУ «Гидрометцентр России», 2020. URL: <https://meteoinfo.ru/> (дата обращения: 24.10.2020).

## REFERENCES

1. Alekseev G.V., 2015. Development and amplification of global warming in the Arctic. Fundamental and Applied Climatology, No. 1, pp. 11–26. (in Russian)
2. Voeikov A.I., 1903. Meteorology: in four parts. Kartograficheskoye zavedeniye A. Ilina, Saint Petersburg. (in Russian)
3. Galin V.Ya., 1998. Parametrization of radiation processes in the atmospheric model of the Institute of Computational Mathematics, Russian Academy of Sciences. Izvestiya RAN. Fizika Atmosfery i Okeana, Vol. 34, No. 3, pp. 380–389. (in Russian)
4. Gribbin J. (ed.), 1980. Climatic change, translated from English by E.K. Butner, V.A. Zubakov. Gidrometeoizdat, Leningrad. (in Russian)
5. Kondratyev K.Ya., 1992. Global climate. Nauka, Saint Petersburg. (in Russian)

6. Lorenz E.N., 1970. The nature and theory of the general circulation of the atmosphere, in S.S. Zilitinkevich (ed.), translated from English by I.L. Vulis. Gidrometeoizdat, Leningrad. (in Russian)
7. Malinin V.N., Gordeeva S.M., 2015. Variability of atmospheric water vapor over the ocean according to satellite data. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, No. 1, pp. 3–11, <https://doi.org/10.7868/S0205961415010042>. (in Russian)
8. Monin A.S., Berestov A.A., 2005. New approaches to climate. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk*, Vol. 75, No. 2, pp. 126–138. (in Russian)
9. Monin A.S., Shishkov Yu.A., 1979. Climate history. Gidrometeoizdat, Leningrad. (in Russian)
10. Monin A.S., Shishkov Yu.A., 2000. Climate as a problem of physics. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, Vol. 170, No. 4, pp. 419–445, <https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200004d.0419>. (in Russian)
11. Palmen E., Newton Ch., 1973. Atmospheric circulation systems, in S.P. Khoromov (ed.), translated from English by I.I. Sheinis. Gidrometeoizdat, Leningrad. (in Russian)
12. Poghosyan H.P., 1976. Cyclones. Gidrometeoizdat, Leningrad. (in Russian)
13. Sidorenkov N.S., 2002. Atmospheric processes and rotation of the Earth. Gidrometeoizdat, Saint Petersburg. (in Russian)
14. Fedorov V.M., 2015. Tendencies in the change of the northern hemisphere sea ice extent and their reasons. *Kriosfera Zemli*, Vol. XIX, No. 3, pp. 52–64. (in Russian)
15. Fedorov V.M., 2018. Solar radiation and the Earth's climate. Fizmatlit, Moscow. (in Russian)
16. Fedorov V.M., 2019. The problem of meridional heat transport into the astronomical climate theory. *Geophysical Processes and Biosphere*, Vol. 18, No. 3, pp. 117–128, <https://doi.org/10.21455/GPB2019.3-8>. (in Russian)
17. Fedorov V.M., Grebennikov P.B., Frolov D.M., 2020. Evaluation of the effect of insolation factor on sea ice extent variability in the Russian Arctic. *Kriosfera Zemli*, Vol. XXIV, No. 3, pp. 38–50, [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3\(38-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3(38-50)). (in Russian)
18. Fedorov V.M., Grebennikov P.B., 2020. Medieval warm period of the Holocene and its possible causes. *The Life of the Earth*, Vol. 42, No. 4, pp. 395–405, [https://doi.org/10.29003/m1768.0514-7468.2020\\_42\\_4/395-405](https://doi.org/10.29003/m1768.0514-7468.2020_42_4/395-405). (in Russian)
19. Fedorov V.M., Kononova N.K., 2015. Solar radiation at the top of the atmosphere and the variability of atmospheric processes in the Northern Hemisphere. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*, No. 576, pp. 183–200. (in Russian)
20. Fedorov V.M., Kostin A.A., 2019. The calculation of the Earth's insolation for the period. *Processes in GeoMedia*, No. 2(20), pp. 254–262. (in Russian)
21. Shuleikin V.V., 1953. Marine physics, 3rd edition, revised and supplemented. Publishing house of the USSR Academy of Sciences, Moscow. (in Russian)
22. Cionco R.G., Soon W.W.-H., 2017. Short-term orbital forcing: a quasi-review and a reappraisal of realistic boundary conditions for climate modeling. *Earth-Science Reviews*, Vol. 166, pp. 206–222, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.013>.
23. Fedorov V.M., 2019. Earth's insolation variation and its incorporation into physical and mathematical climate models. *Physics-Uspekhi*, No. 62(1), pp. 32–45, <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.12.038267>.
24. IPCC, 2013. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds), Chapter 8. Anthropogenic and natural radiative forcing. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 659–740.
25. Kopp G., Lean J.L., 2011. A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, Issue 1, p. L01706, <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>.
26. Lean J., Rottman G., Harder J., Kopp G., 2005. *SORCE contributions to new understanding of global change and solar variability*. In G. Rottman, T. Woods, V. George (eds), The Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE). Springer, New York, NY, USA, pp. 27–53, [https://doi.org/10.1007/0-387-37625-9\\_3](https://doi.org/10.1007/0-387-37625-9_3).
27. Peixoto J.P., Oort A.H., 1984. Physics of climate. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 56, No. 3, pp. 365–429, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.56.365>.
28. Standish E.M., 1998. JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405. Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memorandum No. 312.F-98-048. Publishing house of the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, La Cañada Flintridge, CA, USA.
29. Trenberth K.E., Caron J.M., 2001. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. *Journal of Climate*, Vol. 14, No. 16, pp. 3334–3343.
30. Trenberth K.E., Fasullo J.T., 2009. Changes in the flow of energy through the Earth's climate system. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 18, No. 4, pp. 369–377.
31. The official site of Hydrometcenter of Russia, 2020. URL: <https://meteoinfo.ru/> (accessed: 24 October 2020). (in Russian)

## Информация об авторе

### ФЕДОРОВ ВАЛЕРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

Ведущий научный сотрудник лаборатории геоэкологии Севера географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.н., г. Москва, Россия

## Information about the author

### VALERIY M. FEDOROV

PhD (Geography); Leading Research Scientist in the Laboratory of Geoecology of the Northern Territories, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia