

Астрономическая теория климата: вопросы модернизации и развития

В.М. Федоров

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

В работе рассматривается история возникновения астрономической теории изменения климата, анализируются математические и физические проблемы астрономической теории климата. Изложено содержание солнечной теории изменения климата, в которой на основе расчетов инсоляции с высоким пространственным и временным разрешением найдены инсоляционные характеристики, регулирующие изменение интенсивности переноса радиационного тепла и их астрономические причины. Показана возможность применения солнечной теории климата к моделированию и прогнозу изменений глобального климата Земли.

Ключевые слова: инсоляция, орбитальное движение, солнечный климат, астрономическая теория климата, меридиональный градиент инсоляции, механизмы теплообмена, солнечная теория климата.

Astronomical climate theory: modernization and development issues

V.M. Fedorov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The article deals with the history of emergence of the astronomical theory of climate change, with its contribution to the development of ideas about the solar climate of the Earth being shown. The analysis of mathematical and physical problems of the astronomical theory of climate is given. The article shows the mathematical problems associated with low spatial and temporal resolution and physical problems associated with not taking into account the mechanisms of radiation heat, the problems of transition (modeling) from the solar climate to the global climate. The content of the solar theory of climate change, which is a further development of the astronomical theory of climate, is stated. On the basis of insolation calculations with high spatial and temporal resolution, the insolation characteristics regulating the change in the intensity of radiation heat transfer and their astronomical reasons have been found. In this way, the solar theory of climate provides solutions to the mathematical and physical problems of the astronomical theory of climate. The main insolation characteristics are insolation contrast which reflects changes in the meridional insolation gradient changing due to a change in the inclination of the rotation axis and regulating meridional heat transfer, and insolation seasonality of the Earth and hemispheres, regulating interhemispheric heat exchange and heat exchange in the ocean-atmosphere system. It is shown that the solar theory of climate change can be a physical basis for modeling and forecasting changes in the modern global climate of the Earth.

Keywords: insolation, orbital motion, solar climate, astronomical climate theory, meridional insolation gradient, heat transfer mechanisms, solar climate theory.

For citation: *V.M. Fedorov.* Astronomical climate theory: modernization and development issues. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 64: 435—465. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-435-465.

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 [1, 2]. 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 зональное расположение климатических поясов. С изменением количества радиационного тепла с высотой связана высотная поясность. Во II в. до н.э. Гиппархом 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., а также наклон оси вращения и связанные с ними изменения в поступлении солнечной радиации и ее распределении по широтам и сезонам. Именно этот механизм и анализируется в данной работе.

В перераспределении радиационного тепла 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» [3];
- межполушарного теплообмена [4] и др.

Важным фактором в регулировании термического режима Земли является состав атмосферы (прежде всего, содержание водяного пара), определяющий величину альбедо — отражения приходящей от Солнца коротковолновой радиации, роль парникового эффекта планеты и его изменение [2, 5, 6].

В XX в. отмечена тенденция повышения глобальной приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и температуры 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. В то же время не подвергается сомнению тот факт, что солнечная радиация имеет важнейшее значение в генезисе климата [2, 7—9]. Однако, вопросы изменения ПТВ, ТПО и других характеристик глобального климата и компонентов природной системы в связи с многолетними пространственными и временными вариациями инсоляции исследованы еще недостаточно. Целью работы является определение возможности применения модифицированной астрономической теории климата для объяснения причин изменения современного глобального климата Земли. Представляется логичным предположение о том, что изменения глобального климата Земли связаны с фундаментальными физическими взаимодействиями: гравитационным и электромагнитным [10—12].

Астрономическая теория изменения климата

Начало истории астрономической теории климата относится к середине XIX в. и связано с работами Ж. Адемара, в которых формулируются представления о том, что основной причиной древних оледенений могли быть нарушения в закономерном ходе обращения Земли вокруг Солнца. Согласно представлениям Адемара, ледниковые климаты были функцией 22 000-летнего цикла прецессии, и оледенения происходили поочередно через каждые 11 000 лет, охватывая то одно полушарие, то другое — в зависимости от того, на какое из них приходился период продолжительных зимних сезонов (зимний сезон совпадает с положением Земли вблизи афелия). Однако, расчеты вариаций инсоляции, связанных с прецессией не проводились. Тем не менее, предположение Ж. Адемара о связи возможных климатических изменений с таким астрономическим явлением, как предвращение равноденствий, стало основой для дальнейшего развития представлений об астрономических факторах изменения климата [12—16].

В качестве основополагающего астрономического фактора в представлениях Д. Кролля, наряду с прецессионным циклом, принимаются изменения эксцентриситета земной орбиты. Используя формулы У. Леверье, Д. Кролля рассчитал эксцентриситет земной орбиты для ряда моментов за последние три миллиона лет. При этом учитывались семь известных в то время планет. В результате проведенных расчетов им был определен циклический характер вариаций эксцентриситета. Анализируя полученные данные, Д. Кролля пришел к предположению о том, что причина ледниковых эпох может быть связана с условиями максимально вытянутой орбиты. Из работ У. Леверье следовало, что общее количество энергии, получаемой Землей за год, практически не зависит от изменений эксцентриситета ее орбиты. Однако Кролля показал, что в сочетании с изменением отражательной способности Земли (альбедо) интенсивность радиации, которая поступает на Землю в астрономические полугодия, от изменений эксцентриситета зависит весьма заметно. В результате Д. Кролля была предложена теория, объясняющая глобальные изменения климата (ледниковые и межледниковые эпохи), основу

которой составили сезонные эффекты изменений эксцентриситета земной орбиты, учет влияния альбедо и положительных обратных связей [15, 17]. Представления Д. Кролля, в основе которых были два астрономических фактора — прецессионный цикл и периодическое изменение формы земной орбиты, были опубликованы в «Философском журнале» в 1864 г.

Р. Болль (Ball) придал теории Д. Кролля математическую форму при учете двух параметров: эксцентриситета и прецессии. При этом в качестве влияния на общее количество солнечной энергии, получаемой отдельными полушариями, учитывался третий астрономический фактор — наклон эклиптики. К развитию астрономической теории также относятся работы Л. Мича (Meech), Е. Кельверуэлла (Culverwell), Р. Хэргривса (Hargreaves), Н. Экхольма (Ekholm), но математическая часть задачи наиболее детально (почти сто лет назад) была исследована в работах М. Миланковича [15, 17].

К концу XIX в. было известно, что распределение инсоляции по поверхности Земли зависит от трех орбитальных характеристик: эксцентриситета орбиты, наклона оси вращения и положения точек равноденствия в прецессионном цикле (вариации, определяемые эллипсоидальной формой Земли, на этом этапе не учитывались). В начале XX в. появилась работа немецкого математика Л. Пильгрима (Pilgrim) «Опыт числовой разработки проблемы ледниковых периодов», в которой были изложены результаты новых расчетов этих астрономических характеристик за период времени в 1010 тысячелетий до 1850 г. н.э. В связи с этим расчет количества поступающей солнечной энергии стал принципиально возможным.

Расчеты вековых изменений астрономических элементов Л. Пильгрима за 600 000 лет, пересчитанные В. Мишковичем, стали основой для расчетов М. Миланковичем вековых вариаций инсоляции Земли. М. Миланковичем были определены климатические эффекты вековых вариаций трех астрономических элементов: наклона эклиптики (ϵ), эксцентриситета (e) и долготы перигелия (Π). Так, увеличение наклона оси вращения Земли относительно перпендикуляра к плоскости эклиптики приводит к сокращению годовой суммы радиации в экваториальной области и ее увеличению в полярных областях, то есть происходит сглаживание различий между экваториальной областью и полярными районами. Уменьшение наклона ведет к обратным результатам, усиливая широтные контрасты в распределении солнечной радиации на земной поверхности (без учета атмосферы). При $\epsilon = 0$, когда оба полюса в течение всего года остаются неосвещенными, широтные контрасты максимальны [15, 17]. Изменения наклона оси вращения имеют относительно правильный колебательный характер со средним периодом около 40 000 лет. В течение этого периода широтные различия достигают один раз максимума при наименьшем наклоне эклиптики, причем сезонные различия в это время достигают своего минимума. И один раз — через 20 000 лет — минимума, при наибольшем наклоне, когда сезонные различия выражены максимально. Эти явления повторялись бы периодически, если бы на них не накладывались влияния других астрономических элементов [15, 17].

Вековой ход приходящей солнечной радиации также определяется продолжительностью летнего и зимнего астрономических полугодий, которая является



Рис. 1. Орбитальное движение Земли в современную эпоху.

Fig. 1. Orbital motion of the Earth in the modern era.

функцией двух элементов земной орбиты — эксцентриситета (e) и долготы перигелия (Π). Вследствие изменчивости элементов e и Π , разность в приходе радиации между летним и зимним полугодиями является функцией времени. Так, долгота перигелия приблизительно за 21 000 лет увеличивается почти равномерно на 360° , так как перигелий за это время с почти равномерной скоростью описывает полный круг. Величина эксцентриситета (e) также испытывает колебания с периодом около 92 000 лет со значительно меньшей амплитудой, оставаясь заключенной между 0 и 0,0677. Вследствие влияния обоих факторов величина разности между приходом в летнее и зимнее полугодие колеблется около некоторого среднего значения с периодом в 21 000 лет, а изменчивость амплитуды всех этих колебаний характеризуется периодом около 46 000 лет [15, 17].

Зависимость векового хода приходящей радиации от изменений долготы перигелия (долгота перигелия орбиты — угол между направлением от Солнца на перигелий и точку весеннего равноденствия — в настоящее время равен $102^\circ 08'$) выражается следующим образом (рис. 1).

Разность продолжительности летнего и зимнего полугодий равняется 0 только при долготе перигелия, равной 0° , когда перигелий совпадает с точкой весеннего равноденствия, и при долготе, равной 180° , когда перигелий совпадает с точкой осеннего равноденствия. Равноденственные точки — точки пересечения земной орбиты с плоскостью небесного экватора. При этом суммы приходящей за полугодия солнечной энергии при невозмущенном, кеплеровском движении равны как за полугодия, так и для полушарий [12, 18, 19]. Широтные различия в поступающей на верхнюю границу атмосферы Земли радиации в этих случаях максимальные.

При увеличении долготы перигелия от 0 до 90° продолжительность летнего полугодия северного полушария увеличивается, а зимнего сокращается. В соответствии с этим, интенсивность солнечной радиации в летний период уменьшается, а в зимний — увеличивается. При долготе перигелия, равной 90° , когда перигелий совпадает с точкой зимнего солнцестояния продолжительность летнего полугодия в северном полушарии достигает максимума, а средняя интенсивность

радиации сокращается летом до минимума, увеличиваясь до максимума зимой. По нашим расчетам, такое событие имело место около 1000 г. н.э. [20]. Таким образом, сезонные контрасты в северном полушарии в это время минимальные. В южном полушарии продолжительность летнего полугодия (совпадает с зимним полугодием в северном полушарии) сокращается, в то время как количество радиации, получаемой южным полушарием за короткое лето, равно тому количеству, которое получает северное полушарие за свое более продолжительное лето. Поэтому в южном полушарии более короткое летнее полугодие в это время характеризуется большей интенсивностью приходящей солнечной радиации, а более продолжительное зимнее полугодие — меньшей. Следовательно, сезонные различия в южном полушарии в это время максимальные, в отличие от северного полушария.

При долготе перигелия, равной 180° , когда перигелий совпадает с точкой осеннего равноденствия, летнее и зимнее полугодие имеют равную продолжительность в северном и южном полушариях. Суммы приходящей за полугодия солнечной энергии равны, как за полугодия, так и для полушарий. Широтные различия в поступающей на верхнюю границу атмосферы Земли радиации в этих случаях максимальны. При долготе перигелия, равной 270° , когда перигелий совпадает с точкой летнего солнцестояния продолжительность летнего полугодия в северном полушарии минимальная, и противоположность между летним и зимним полугодиями выражена наиболее резко. В южном полушарии для этой долготы перигелия отмечается обратная ситуация — продолжительный летний сезон с меньшей интенсивностью приходящей радиации и менее продолжительный — зимний с большей интенсивностью приходящей радиации. Сезонные контрасты при этом сглаживаются.

Таким образом, широтные различия максимальны при положении перигелия в равноденственных точках и сглаживаются при положении перигелия в точках солнцестояния. При этом, если перигелий находится в точке зимнего солнцестояния, сезонные различия в южном полушарии выражены наиболее контрастно, а в северном они сглаживаются. При положении перигелия в точке летнего солнцестояния ситуация становится обратной. В этом случае сезонные контрасты максимально выражены в северном полушарии и сглаживаются в южном полушарии [15, 17].

Важно отметить, что все отмеченные климатические эффекты, связанные с изменением астрономических характеристик, относятся только к солярному климату Земли. Напомним, что под солярным климатом Земли понимается рассчитываемое теоретически поступление и распределение солнечной энергии на верхней границе атмосферы (ВГА) или на поверхности Земли в отсутствии атмосферы [12, 15, 17, 21].

На основе расчетов вековых изменений астрономических элементов (выполненных В. Мишковичем) М. Миланковичем были рассчитаны значения летней инсоляции для параллели 65° северного полушария за последние 600 000 лет. Полученный Миланковичем график инсоляции в значениях широтных эквивалентов впервые был опубликован в 1924 г. в работе В. Кёппена (Köppen) и А. Вегенера

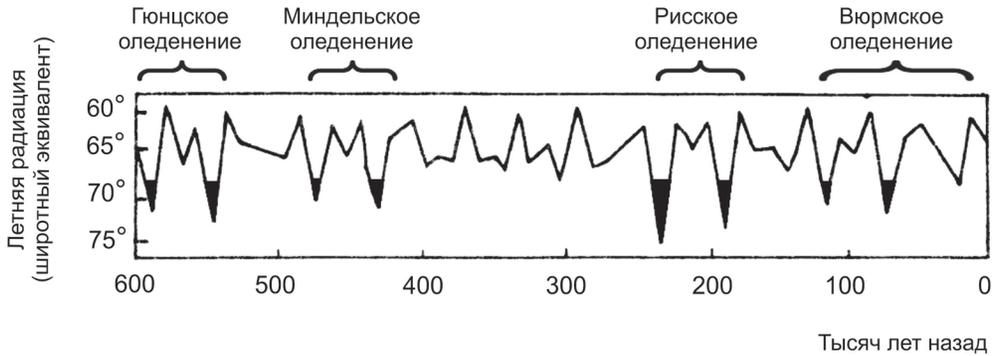


Рис. 2. Амплитуды вековых отклонений летних сумм радиации для 65° с.ш. в значениях широтных эквивалентов [14].

Fig. 2. Amplitudes of secular deviations of summer radiation sums for 65° N in the values of latitudinal equivalents [14].

(Wegener) «Климаты прошлого» (рис. 2). Под эквивалентными широтами для 65° с.ш. понимаются широты, на которых в настоящее время за летнее калорическое полугодие поступает столько же солнечной радиации, сколько в прошлом поступало на широте 65° с.ш. Увеличение эквивалентной широты означает сокращение поступающей радиации, и наоборот. Например, поступающая к Земле солнечная радиация на 65° с.ш. 590 000 лет назад характерна для широты 72° с.ш. в эпоху 1800 г.

Вместо расчета сумм тепла за летнее и зимнее полугодия М. Миланкович использовал калорические полугодия. Калорические полугодия определяются как полугодия одинаковой продолжительности ($T_0/2$), когда на данной широте любое значение суточной инсоляции в летнее полугодие больше любого значения суточной инсоляции в зимнее полугодие. Продолжительность тропического года — период между двумя последовательными положениями Земли в точке весеннего равноденствия — считалась постоянной. При расчетах использовались канонические единицы. Величина солнечной постоянной, равная $2 \text{ кал/мин} \cdot \text{см}^2$ или $1395,6 \text{ Вт/м}^2$, соответствовала 1 канонической единице, продолжительность тропического года 100 000 каноническим единицам. В дальнейшем М. Миланковичем были рассчитаны вариации инсоляции для восьми параллелей, расположенных между 5 и 75° с.ш. Основные результаты его исследований изложены в работе «Математическая климатология и астрономическая теория изменения климата» [15].

Расчеты, произведенные М. Миланковичем, в дальнейшем выполнялись и уточнялись рядом авторов (рис. 3, 4). Эти расчеты основывались на новых решениях теории вековых возмущений, полученных для всей Солнечной системы в 1950 г. Д. Брауэром и А. Ван Вуркомом [22]. В расчетах использовались последние данные о массах и движении планет, учитывались эффекты второго порядка, вызванные, например, долгопериодическими вариациями в движении Юпитера и Сатурна.

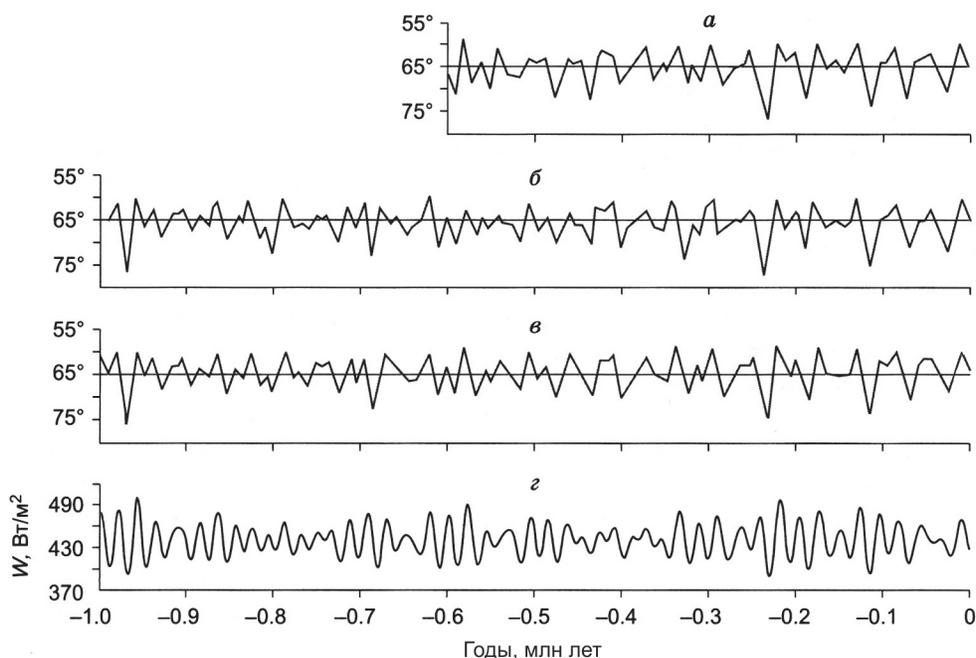


Рис. 3. Изменение инсоляции за летнее калорическое полугодие для широты 65° северного полушария по данным разных исследователей [24]: а) [15]; б) [22]; в) [23]; з) [25].

По оси абсцисс отложено время в тысячелетиях от 1950 г.; по оси ординат:
 а, б, в — инсоляция в эквивалентных широтах в течение летнего полугодия;
 з — среднемесячная инсоляция в июле в $Вт/м^2$.

Fig. 3. Changes in insolation over the summer caloric half-year for latitude 65° of the northern hemisphere according to the data of various researchers [24]: а) [15]; б) [22]; в) [23]; з) [25].

The abscissa shows time in millennia from 1950; along the ordinate:
 а, б, в — insolation at equivalent latitudes during the summer half of the year,
 з — mean monthly insolation in July W/m^2 .

Детальные расчеты приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации провели советские астрономы Ш.Г. Шараф и Н.А. Будникова [23]. Ими были обнаружены ошибки в исходных значениях долготы узлов Венеры и Земли, использованных Д. Брауэром и А. Ван Вуркомом. На основе исправленных значений Ш.Г. Шараф и Н. А. Будниковой были пересчитаны постоянные интегрирования и выведены тригонометрические формулы для прецессии и наклона оси вращения, которые включали члены второго порядка для эксцентриситета и наклона. В результате ими были рассчитаны вариации инсоляции на период 30 млн лет в прошлое и на 1 млн лет в будущее. Оказалось, что значения эксцентриситета колебались в пределах 0,0007—0,0658 (в настоящее время 0,01675), преимущественно с периодами около 0,1; 0,425 и 1,2 млн лет. Изменения величины наклона

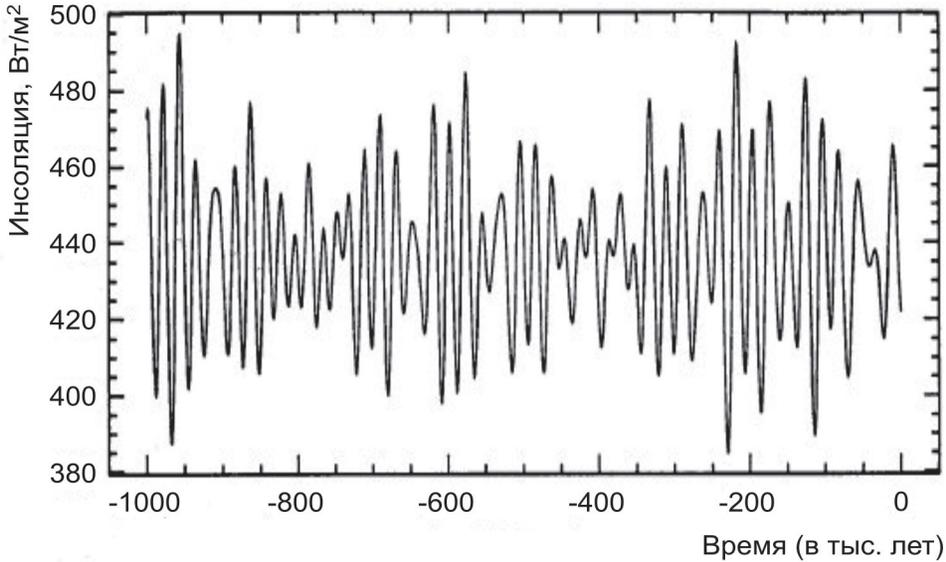


Рис. 4. Инсоляция, рассчитанная на 21 июля
(120° геоцентрической долготы) для 65° с.ш. [26]

Fig. 4. Insolation calculated for July 21 (120° geocentric longitude) for 65° N. [26]

оси вращения происходили с периодами около 41 и 200 тыс. лет и определялись в диапазоне от 22,068 до 24,568°. Отклонения величин $e \cdot \sin \Pi$ от его значения в 1950 г. колебались в пределах от +0,03 до -0,07 со средним периодом около 21 тыс. лет. Вариации эквивалентных широт определялись пределами 58—79° с преобладающими периодами в 41 тыс. и 1,2 млн лет. Построенные Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой графики хода эквивалентных широт приведены на рис. 3.

Жак Ласкар подготовил решение для орбитальных, прецессионных и наклонных переменных для расчетов низкочастотных вариаций инсоляции [26]. Эфемериды DE-406 (DE — Development Ephemeris) он использовал как эталон для тестирования своих решений на коротком участке времени. Отметим, что нами эти эфемериды DE-406 использовались в качестве исходных астрономических данных для расчетов вариаций инсоляции с большим пространственным и временным разрешением [27, 28]. В приведенной работе [26] инсоляция рассчитывалась только на параллель 65° с.ш. и только на 1 день в году, когда Солнце находилось в 120° эклиптической долготы (лето в северном полушарии) с шагом (на периоде в 1 млн лет), равном 1000 лет (рис. 4).

С использованием полученных Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой значений изменений наклона оси, эксцентриситета и долготы перигелия в Институте океанологии Российской Академии Наук были рассчитаны значения инсоляции на миллион лет в прошлое и будущее относительно современной эпохи (начало 1950 г.) с шагом по времени в 5 тыс. лет и по широте в 10° [2, 29].

Суммарная за калорические полугодия радиация рассчитывалась на основе соотношения:

$$Q_{s,w} = \frac{I_0 T_0}{2\pi} \left[S(\varphi, \varepsilon) \pm \sin \varphi \sin \varepsilon \pm \frac{4}{\pi} e \sin \Pi \cos \varphi \right], \quad (1)$$

где I_0 — солнечная постоянная (равная 2 кал/мин см² или 1395,6 Вт/м²); T_0 — продолжительность тропического года (принимается постоянной); S — функция, описывающая распределение годовой инсоляции по меридиану, φ — географическая широта; Π — долгота перигелия; e — эксцентриситет, ε — наклон эклиптики. Из формулы (2) видно, что величины $Q_{s,w}$ зависят от наклона оси ε и от элементов земной орбиты r_0 (через I_0 и T_0), e и Π [10]. Расчеты с использованием формулы (1) показали, что аномалии инсоляции за калорические полугодия максимальны в летних полярных областях, где они достигают значений ± 250 МДж/м² и, в общем, убывают в сторону зимних полярных районов. Отмечается, что изменение аномалий имеет квазипериодический характер с периодом около 40 000 лет [29].

Повторные расчеты вековых изменений элементов земной орбиты и инсоляции также были выполнены А. Вернекаром [30]. Позднее А. Берже [16] предложил улучшение для решения Д. Брауэра и А. Ван Вуркома, включив для эксцентриситета и наклона оси члены третьего порядка, и рассчитал вариации элементов орбиты и инсоляции. Сравнение рассчитанных вариаций солнечной радиации приведено на рис. 3. Из представленных графиков (рис. 3, 4) видно, что последний максимум в поступлении солнечной радиации для северного полушария отмечался около 10 тыс. лет назад, что соответствует общим представлениям о времени начала активной фазы деградации покровного оледенения в Европе и Северной Америке и началу фазы уменьшения наклона оси вращения Земли (рис. 5).

С этого времени происходит постепенное сокращение поступающей солнечной радиации, которое, по расчетам Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой, будет продолжаться еще около 10 тыс. лет [23].

Таким образом, перерасчет инсоляции Земли неоднократно проводился, однако только в связи с появлением новых астрономических данных. Принятая Миланковичем схема объяснения климата при этом не подвергалась модернизации и развитию. Ее основу составлял только учет изменения летней инсоляции на 65° с.ш. В астрономической теории климата не учитывался вклад в изменение температурного режима Земли механизмов переноса радиационного тепла (теплообмена), связанных с неравномерным приходом и распределением солнечной радиации [32, 33]. Очевиден голоценовый парадокс в астрономической теории климата [33], определяемый тем, что поступление солнечной радиации к Земле приблизительно с начала голоцена (11 700 лет назад) сокращается. При этом мы живем в межледниковой эпохе, и тенденция снижения глобальной температуры не отмечается. Используемые М. Миланковичем и некоторыми его последователями калорические полугодия равной продолжительности не позволяют рассчитывать сезонность инсоляции, которая регулирует интенсивность межполушарного теплообмена и теплообмена в системе «океан—материк».

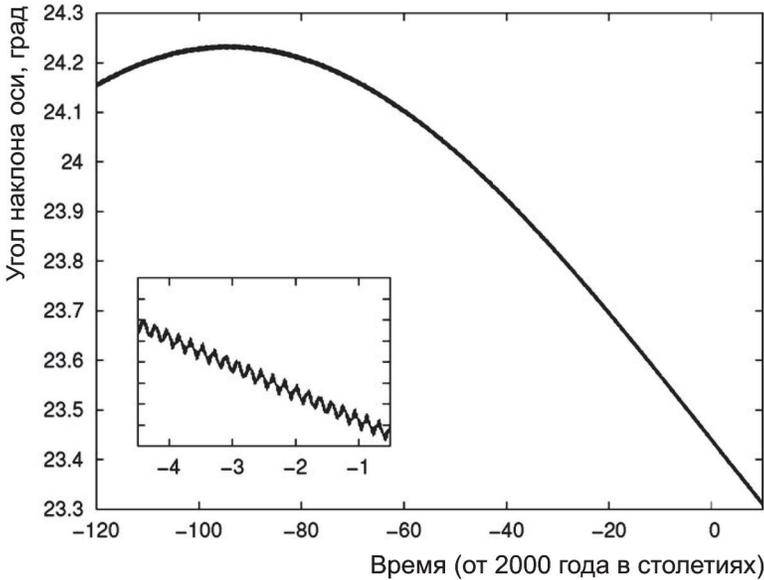


Рис. 5. Изменение угла наклона оси вращения Земли [31].

Fig. 5. Changing the tilt of the Earth's axis of rotation [31].

В целом, к истории развития астрономической теории климата относится получение серии расчетных значений вековых или низкочастотных вариаций приходящей солнечной радиации (солярного климата Земли), связанных с вековыми вариациями элементов орбиты Земли: эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси вращения. Количественные результаты этого решения — расчета вековых вариаций солнечной радиации — у различных исследователей несколько отличаются в связи с различиями в начальных условиях и в способах расчетов (рис. 3, 4.). Однозначного решения проблемы глобальных климатических изменений (развития оледенений) с позиций астрономической теории климата получено не было. С появлением методов абсолютного датирования появились сомнения в состоятельности астрономической теории климата, точнее, в схеме, предложенной М. Миланковичем, которая учитывала только вариации приходящей на 65° с.ш. за летнее полугодие солнечной радиации. Тем не менее, астрономическая теория климата сохраняла свою привлекательность, вероятно, в связи с ее ориентацией на фундаментальные физические взаимодействия в макромире: гравитационное и электромагнитное. Это подтверждается поисками путей ее модернизации (например, орбитальный тюнинг) и развития [12]. Однако, орбитальный тюнинг представляет собой формальную математическую подгонку рассчитанных значений инсоляции и данных изотопно-кислородного анализа ледникового льда Антарктиды и Гренландии и донных фораминифер. Механизмы формальной синхронизации [13, 34] не имеют при этом физического обоснования.

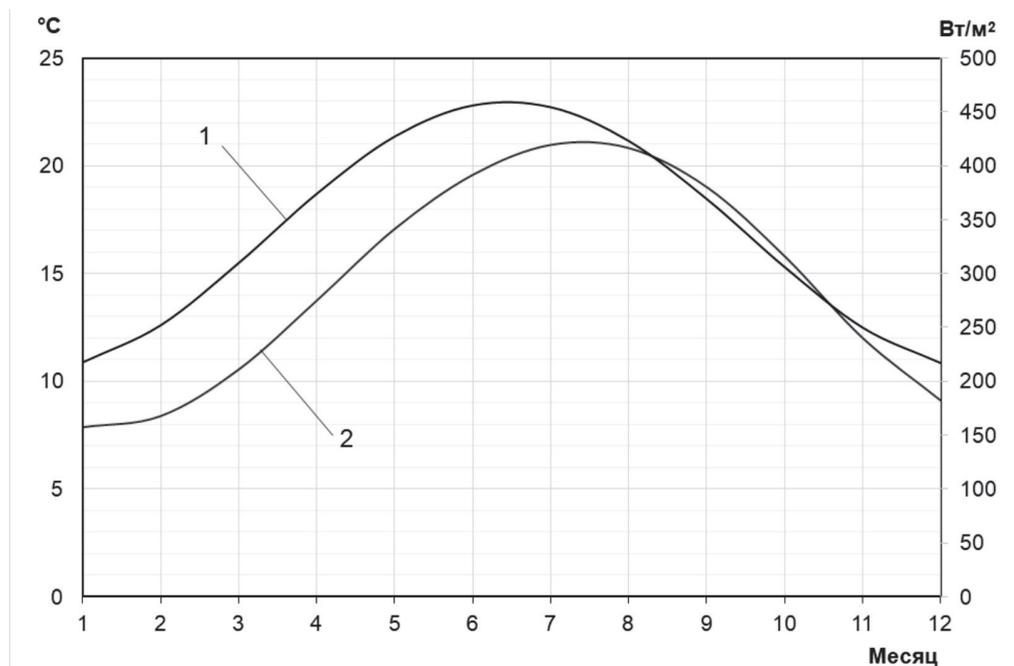


Рис. 6. Средний годовой ход инсоляции (1) и приповерхностной температуры воздуха (2) в северном полушарии за период 1961—1990 гг.

Fig. 6. Average annual course of insolation (1) and surface air temperature (2) in the northern hemisphere for the period 1961—1990.

В формате астрономической теории климата М. Миланковичем и его последователями получены характеристики солярного климата Земли. Отмеченные выше климатические эффекты, связанные с эксцентриситетом, наклоном оси и долготой перигелия (прецессией), также относятся исключительно к солярному климату. Физическую основу перехода от солярного к глобальному климату в астрономической теории климата составляет принятие прямой зависимости температуры от вариаций приходящей радиации. Однако это справедливо только для суточного (и то не всегда) и годового хода температуры и солнечной радиации (рис. 6).

Многолетние изменения температуры, как показали наши исследования [12], связаны, главным образом, с изменением меридионального переноса тепла — «тепловая машина первого рода» — регулируемого меридиональным градиентом инсоляции. Изменение меридионального градиента инсоляции определяется изменением наклона оси вращения [3]. Другими факторами изменения температурного режима является межполушарный теплообмен, который регулируется инсоляционной сезонностью Земли и теплообмен в системе «океан—атмосфера», зависящий от инсоляционной сезонности полушарий — «тепловая машина второго рода». Таким образом, физическую основу моделирования климата

должны составлять такие радиационные характеристики, как вариации приходящей на ВГА годовой и сезонной радиации, меридиональный градиент инсоляции (МГИ) или инсоляционная контрастность (ИК), инсоляционная сезонность Земли и полушарий. Следовательно, в существующем виде астрономическая теория климата по ее физическим основам не может применяться к объяснению изменений современного климата и палеоклимата.

Кроме физических причин невозможность применения астрономической теории климата к объяснению современного климата связана и с математическими причинами.

Инсоляция рассчитывалась М. Миланковичем для отдельных параллелей с разрешением по времени около 5000 лет [15, 17]. Его последователями инсоляция также рассчитывалась для отдельных параллелей с разрешением по времени от 5000 [23] до 1000 лет [16, 22, 25, 26, 30]. При расчетах учитывались изменения таких астрономических параметров как эксцентриситет, долготы перигелия и наклон оси вращения, регулирующие инсоляцию Земли с периодичностью в десятки тыс. лет. Следовательно, такое низкое временное разрешение не позволяет применять астрономическую теорию климата к объяснению причин изменения современного глобального климата.

Расчеты, учитывающие периодические возмущения элементов земной орбиты, и связанные с ними высокочастотные вариации солнечной радиации выполнялись в Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова, в России [35]. Исследования высокочастотных вариаций инсоляции проводятся в институте астрономии и геофизики имени Г. Леметра, Бельгия [36—38]. Однако, расчеты с разрешением по времени, равном суткам, выполнялись, во-первых, также для отдельных параллелей. Во-вторых, только для четырех (точек равноденствий и солнцестояний) или пяти (кардинальные точки и точка с гелиоцентрической долготой 120°) суток в году. В этом случае временное разрешение также ограничивает применение астрономической теории к исследованию причин и прогнозированию изменений современного глобального климата.

Таким образом, существуют связанные с низким пространственным и временным разрешением расчетов инсоляции, математические и физические (учет вариаций только приходящей радиации) проблемы. Эти проблемы исключают возможности применения астрономической теории климата в ее существующем виде как к объяснению глобальных климатических событий плейстоцена, так и к объяснению изменений современного глобального климата Земли. Тем не менее, астрономическая теория климата позволила получить данные по инсоляции Земли, а также определить эффекты солярного климата связанные с эксцентриситетом, долготой перигелия и наклоном оси. Однако, переход от солярного климата к глобальному и моделирование температурного режима глобального климата Земли было выполнено М. Миланковичем и его последователями упрощенно с учетом только вариаций приходящей на 65° с.ш. солнечной радиации за летнее полугодие и без учета связанных с неравномерным приходом и распределением солнечной радиации механизмов переноса радиационного тепла (теплообмена).

Солярная теория климата

Для преодоления математической проблемы применения астрономической теории климата к объяснению изменений глобального климата, автором совместно с А.А. Костиным [27, 28] были выполнены расчеты инсоляции с высоким пространственным и временным разрешением на 5000 лет в прошлое и на 999 лет в будущее (относительно 2000 г.). Исследования вариаций солярного климата Земли в диапазоне современности представляются перспективными по следующим причинам. Во-первых, этот интервал времени обеспечен астрономическими данными, обладающими наибольшей в настоящее время точностью. Во-вторых, он также обеспечен подробной климатологической информацией, что позволяет проводить детальные исследования связи вариаций климатических элементов с характеристиками инсоляции. Найденные связи могут использоваться при палеогеографических реконструкциях в соответствии с известным в геологии методом актуализма или моделировании палеоклимата.

Инсоляция Земли (удельная энергия облучения — УЭО, Дж/м² и интенсивность облучения — ИО, Вт/м²) рассчитывалась с большим пространственным и временным разрешением. Расчеты выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид (DE-406, NASA) [39] 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 (UT). 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:

$$I_{nm}(\varphi_1, \varphi_2) = \int_{t_1}^{t_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(\varphi) \left(\int_{-\pi}^{\pi} \Lambda(t, \varphi, \alpha) d\alpha \right) d\varphi dt, \quad (2)$$

где I — приходящая солнечная радиация за элементарный n -й фрагмент m -го тропического года (Дж); σ — площадной множитель (м²), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал; $\sigma(\varphi)d\alpha d\varphi$ — площадь бесконечно малой трапеции — ячейки эллипсоида; α — часовой угол; φ_1, φ_2 — географические широты, выраженные в радианах; $\Lambda(t, \varphi, \alpha)$ — солнечная радиация в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида (Вт/м²); 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. Изменение активности Солнца не учитывалось. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI — Total Solar Irradiance) принималось равным 1361 Вт/м² [40]. Подробно методика выполненных расчетов приходящей на эллипсоид Земли солнечной энергии изложена в [12, 27, 28].

Основные отличия нашего подхода по времени, пространству и исходным данным от известных из астрономической теории климата расчетов низкочастотных вариаций инсоляции заключаются в следующем:

1) **По времени.** М. Миланкович и его последователи рассчитывали инсоляцию Земли на длительные периоды времени (от нескольких сотен тысяч до миллионов лет) с учетом только ее вековых вариаций, связанных с изменением эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси вращения Земли. Периоды изменений этих астрономических характеристик составляют несколько десятков тысяч лет. Разрешение по времени в расчетах составляло приблизительно от 5 000 лет в расчетах М. Миланковича [15, 17], Ш. Шараф и Н. Будниковой [23], С.А. Моница [29] до 1000 лет в работах А. Вернекара [30], А. Берже [16, 25], Ж. Ласкара [26]. Миланкович и его последователи рассчитывали суточную и годовую инсоляцию на некоторый начальный год (например, 1850 или 1950 г.). Затем совершался шаг от 1000 до 5000 лет в прошлое или в будущее, и процедура расчетов с учетом изменения эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси повторялась. Периодические вариации инсоляции не учитывались. Продолжительность тропического года принималась постоянной. В наших расчетах учитывались вековые и периодические вариации таких астрономических характеристик, как расстояние Земля—Солнце, продолжительность тропического года, наклон оси вращения и т.д. Разрешение по времени при интегрировании в наших расчетах составляло $1/360$ часть продолжительности тропического года (приблизительно сутки) с учетом вариаций этой продолжительности [12].

2) **По пространству.** М. Миланковичем и всеми его последователями расчеты выполнялись только для отдельных географических параллелей. При этом считалось, что Земля имеет форму сферы. В наших расчетах инсоляция рассчитывалась для всей земной поверхности, аппроксимируемой эллипсоидом и ее отдельных широтных зон. Разрешение по пространству при интегрировании составляло по долготе 1° , по широте 1° . То есть в расчетах Миланковича и его последователей использовалась линия — в математике характеристика пространства первого порядка. Мы рассчитывали на площадь — характеристику пространства второго порядка.

3) Для выполнения расчетов М. Миланковичем на длительный период были рассчитаны астрономические эфемериды для эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси вращения Земли, которые в дальнейшем уточнялись его последователями [16, 22, 26, 30, 41]. Нами для расчетов инсоляции использовались приведенные в формуле (2) параметры, учитывающие вековые и периодические вариации элементов орбиты Земли и оси ее вращения. В качестве исходных данных для расчетов использовались высокоточные астрономические эфемериды, рассчитанные в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института на период от 3000 лет до н.э. до 2999 лет н.э. и размещенные на электронном ресурсе NASA [42] DE-406.

Отличия нашего подхода в анализе высокочастотных вариаций инсоляции от методов Е.П. Борисенкова, М.-Ф. Луэтр (Loutre), С. Бертрана (Bertrand) и их коллег связаны, во-первых, с исходными астрономическими данными, используемыми

в расчетах. Во-вторых, с различным решением расчетов инсоляции относительно поверхности Земли. В-третьих, по временному интервалу, охваченному расчетами. В качестве исходных данных Борисенковым с коллегами использовались эфемериды, рассчитанные в Институте теоретической астрономии Академии наук СССР (e-mail сообщение А.В. Цветкова, 2015). Исходными данными для расчетов, выполненных бельгийскими исследователями [37, 38], были эфемериды VSOP82 [41]. В наших расчетах использовались JPL (Jet Propulsion Laboratory) Planetary and Lunar Ephemerides DE-405/406 [39, 42].

Поверхность Земли при расчетах инсоляции отождествлялась нашими предшественниками со сферой, и расчеты выполнялись только для отдельных параллелей. Е.П. Борисенковым с коллегами [35] получены значения только для параллелей 20, 40, 60 и 80° с.ш. В исследованиях бельгийских ученых [38] расчеты выполнялись на середину июля (точнее для точки с геоцентрической долготой равной 120°) только для параллели 65° с.ш. Для точек равноденствия и солнцестояния инсоляция рассчитывалась для экватора и параллелей 30, 60 и 90° в каждом полушарии. Напомним, что геоцентрическая долгота Солнца — это угол между направлением из центра Земли на точку весеннего равноденствия и Солнце. Точки весеннего и осеннего равноденствия — точки пересечения плоскости земной орбиты (эклиптики) с плоскостью небесного экватора [10, 11].

В работе С. Бертрана с коллегами [37] расчеты инсоляции охватывают предшествующее тысячелетие, они также относятся к июлю (точке с геоцентрической долготой равной 120°) и рассчитаны для широтной зоны 65—70° с.ш. При этом значения для широтной зоны рассчитывались осреднением значений, полученных для ограничивающих широтную зону параллелей 65 и 70°. В наших расчетах поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом, и приходящая радиация рассчитывалась не на отдельные параллели, а на поверхность отдельных широтных зон с разрешением по широте в 1° и всей Земли. Кроме того, нами также были получены количественные характеристики влияния формы Земли на облучение ее поверхности [43].

Разрешение по времени при расчетах высокочастотных вариаций инсоляции в работе Е.П. Борисенкова с коллегами приблизительно соответствуют суткам [35]. Однако выполненные ими расчеты представлены только для зимнего и летнего полугодий и только для северного полушария в интервале с 1800 по 2100 гг. В работе М.-Ф. Лутр с коллегами [38] расчеты проводились на интервале в 5000 лет в прошлое с годовым разрешением и только для июля (отдельной точки с геоцентрической долготой 120°), точек равноденствия и солнцестояния. В работе С. Бертрана с коллегами [37] расчеты инсоляции охватывают предшествующее тысячелетие, но они относятся только к одному месяцу (июлю) и выполнены с годовым разрешением. Кроме этого, значение солнечной постоянной в наших расчетах принималось равным 1361 Вт/м² [40]. В работах наших предшественников — 1368 Вт/м² [37], 1367 Вт/м² — в работе Е.П. Борисенкова с коллегами [35] и M.F. Loutre с коллегами [38], а также 1366 Вт/м² [36].

Выполненные нами расчеты основаны на высокоточных эфемеридах, в них используется новое значение солнечной постоянной (1361 Вт/м²) [40], более детально

охватывается временной интервал протяженностью в 5999 лет и вся поверхность Земли. Земля в наших расчетах не отождествляется со сферой, а аппроксимируется эллипсоидом. Выполненные расчеты, таким образом, закрывают пространственные и временные «бреши» в расчетах инсоляции для периода от 3000 лет до н.э. до 2999 лет н.э. Это, во-первых, создает возможности для детального анализа инсоляции Земли, изменения ее солярного климата в отмеченном интервале времени. Во-вторых, создает основы для преодоления математических, связанных с малым пространственным и временным разрешением в расчетах инсоляции проблем, ограничивающих возможность применения астрономической теории климата к объяснению изменений современного глобального климата. Выполненные с высоким пространственным и временным разрешением расчеты (т. е. решение математической проблемы) позволили определить физические причины изменения современного глобального климата и создать основы для физико-математического и статистического моделирования и прогноза глобального климата Земли, т. е. найти решение физической проблемы астрономической теории климата.

Анализ рассчитанной инсоляции показывает, что в современную эпоху (голоцен) отмечается слабая тенденция к сокращению приходящей солнечной радиации [12, 19, 21]. Так за период от 3000 до н.э. до 2999 н.э. сокращение приходящей за год к Земле солнечной радиации, по нашим данным, составляет 0,005 %. Эта тенденция связана с низкочастотной вариацией эксцентриситета земной орбиты с периодом около 92 000 лет [15]. Тенденция к сокращению инсоляции для современной эпохи в летнее полугодие на параллели 65° с.ш. отмечается и в расчетах, графически представленных на рис. 3, 4. Однако, более существенные изменения инсоляции происходят по широтам и сезонам года (рис. 7).

При общем малом сокращении приходящей к земному эллипсоиду за тропический год солнечной энергии в районах ниже 45° широты каждого полушария проявляется более заметная тенденция к увеличению, а выше 45° — к сокращению инсоляции. Следовательно, еще одна из тенденций в изменении приходящей от Солнца энергии в современную эпоху — усиление широтной контрастности или увеличение меридионального градиента инсоляции [12, 19, 33].

Напомним, что 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) [44]. Учитывая, что температура окружающего Землю пространства составляет -273 °С и среднегодовая приповерхностная температура Земли — около $+15$ °С, приходящей от Солнца радиацией определяется приблизительно 86 % тепла (249°), а парниковым эффектом планеты — 14 % (39°). Логично предположить, что отмечаемые в современную эпоху в природной системе Земли изменения обусловлены, прежде всего, изменением отмеченных выше факторов формирования климата: солнечной радиации и парникового эффекта планеты, связанного, главным образом, с содержанием водяного пара в атмосфере.

Годовое поступление к Земле солнечной радиации за 5999 лет, как отмечалось ранее, сокращается всего на 0,005 %. Однако отмечается увеличение инсоляции в экваториальной области (на 0,25 %) и сокращение в полярных районах

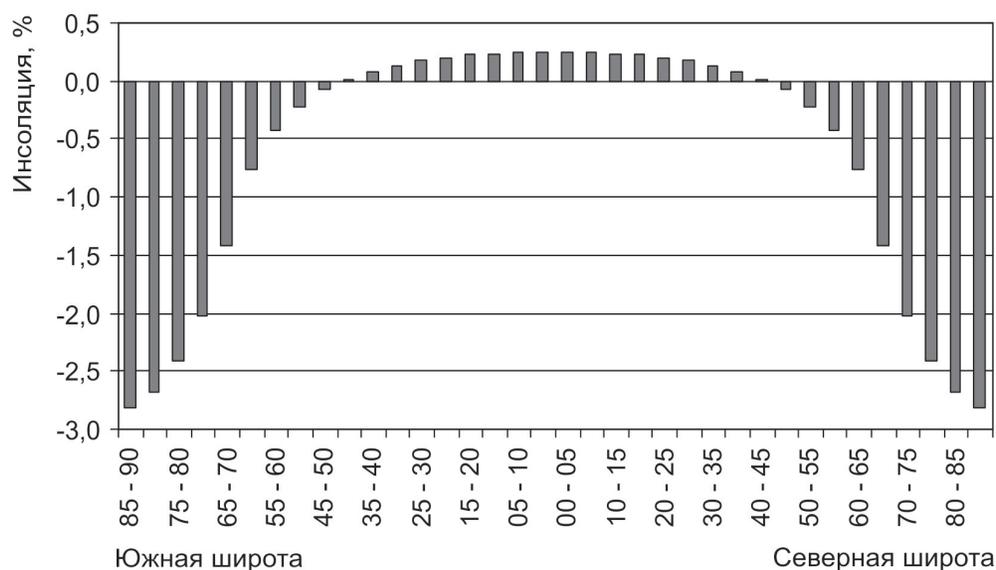


Рис. 7. Изменение годовой инсоляции Земли в широтных зонах с 3000 г. до н.э. по 2999 г. нашей эры в процентах от 3000 г. до нашей эры [12].

Fig. 7. Change in the annual insolation of the Earth in latitudinal zones from 3000 BC to AD 2999 as a percentage of 3000 BC [12].

(на 2,73 %) — тенденция усиления меридиональной контрастности в солярном климате (рис. 7) [12, 19, 21].

Сезонные вариации приходящей солнечной радиации заметно больше вариаций годовой инсоляции. Отмечается сокращение инсоляции в летние для полушарий полугодия (на 2,9 %) и увеличение в зимние полугодия (на 3,75 %) — проявляется тенденция сглаживания сезонных различий в солярном климате Земли (рис. 8). В результате сокращение приходящей на 65° с.ш. в летнее полугодие солнечной радиации определяется уменьшением наклона оси (рис. 5).

Из-за неравномерности в распределении солнечной радиации по земной поверхности возникает связанный с формой Земли меридиональный градиент инсоляции (МГИ) [12, 33, 44, 45, 46, 47]. На основе выполненных расчетов получен широтный профиль изменения годового МГИ за 5999 лет (рис. 9). Максимумы увеличения МГИ локализованы вблизи полярных кругов (60—70° широты — годовые зоны неустойчивости). Под широтными зонами неустойчивости нами понимаются широтные зоны, в которых отмечаются максимальные изменения МГИ. Отмеченные зоны неустойчивости совпадают с районами максимального развития внетропических циклонов в полушариях. Кроме того, увеличение годовых значений МГИ также приходится на области локализации циркуляционных ячеек Хэдли и Ферреля в атмосфере, уменьшение отмечается в областях локализации полярных ячеек.

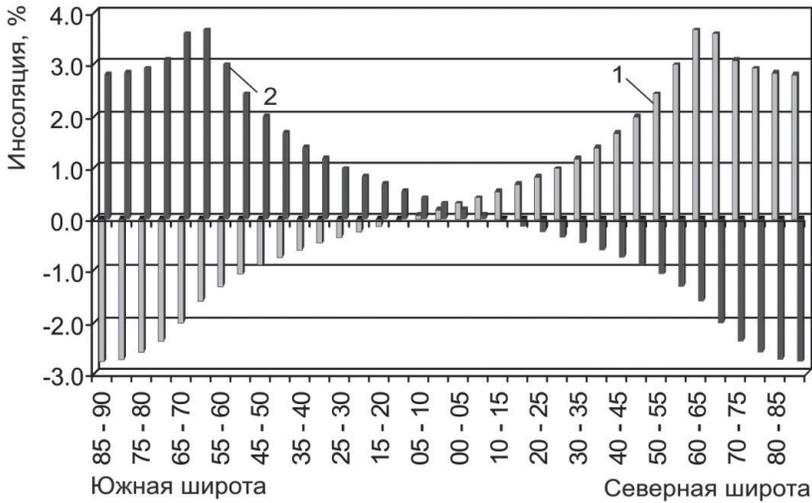


Рис. 8. Изменение полугодовой инсоляции Земли в широтных зонах с 3000 г. до н.э. по 2000 г. н.э. в процентах от 3000 г. до н.э.:

1 — зимнее; 2 — летнее полугодие для северного полушария [12].

Fig. 8. Changes in the semi-annual insolation of the Earth in latitudinal zones from 3000 BC to AD 2000 as a percentage of 3000 BC [12]:

1 — winter semester; 2 — summer semester for the Northern Hemisphere.

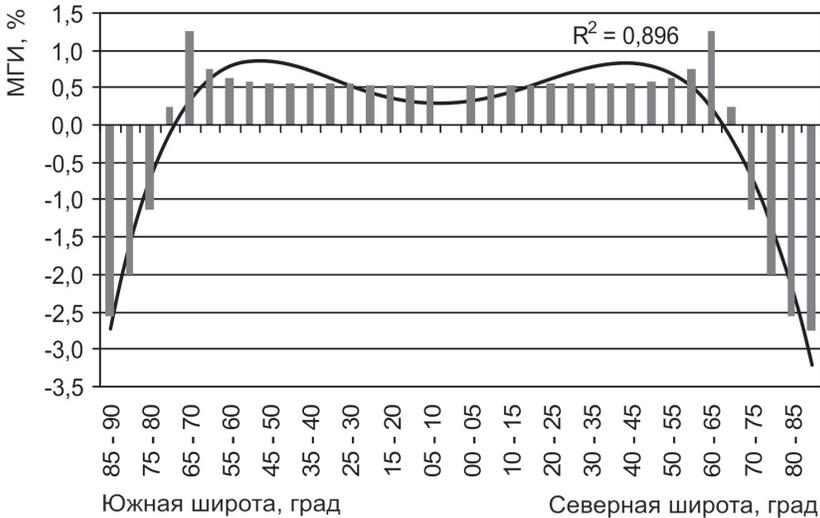


Рис. 9. Изменение годового меридионального градиента инсоляции за 5999 лет (аппроксимация — полином четвертой степени) от 3000 г. до н.э. [12].

Fig. 9. Change in the annual value of the Interannual Insolation Gradient for 5999 years (approximation — a polynomial of the 4th degree) from 3000 BC [12].

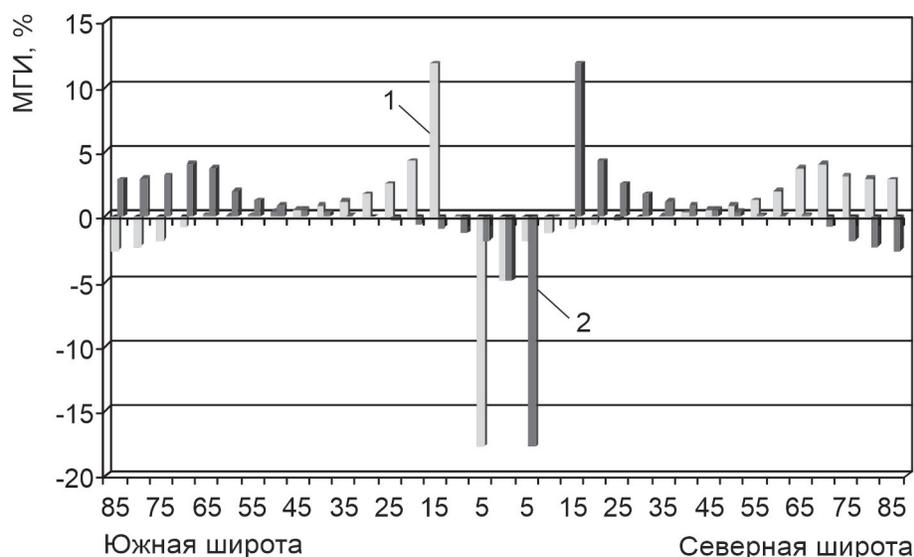


Рис. 10. Изменение меридионального градиента инсоляции за 5999 лет от 3000 г. до н.э.:

1 — зимнее; 2 — летнее полугодие для северного полушария [12].

Fig. 10. Change in Interannual Insolation Gradient for the winter (1) and summer (2) semesters for the Northern Hemisphere for 5999 years from 3000 BC [12].

На рис. 10 представлены многолетние изменения МГИ для зимнего и летнего (в северном полушарии) полугодия. 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 сокращение (17,8 %) — в широтной зоне 5—10° с.ш.

Из рис. 10 следует, что в летних полугодиях в обоих 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 в переносе радиационного тепла совпадают с областями генерации тропических циклонов, локализованных в широтных диапазонах 5—20° каждого полушария. С вихревым переносом энергии связана работа «тепловой машины первого рода» — механизма меридионального переноса тепла (МПТ) из низких широт в высокие [12, 33, 44]. В полярных областях (полярные циркуляционные ячейки) в зимние полугодия в полушариях отмечается увеличение сезонного МГИ, а в летние полугодия — его сокращение.

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

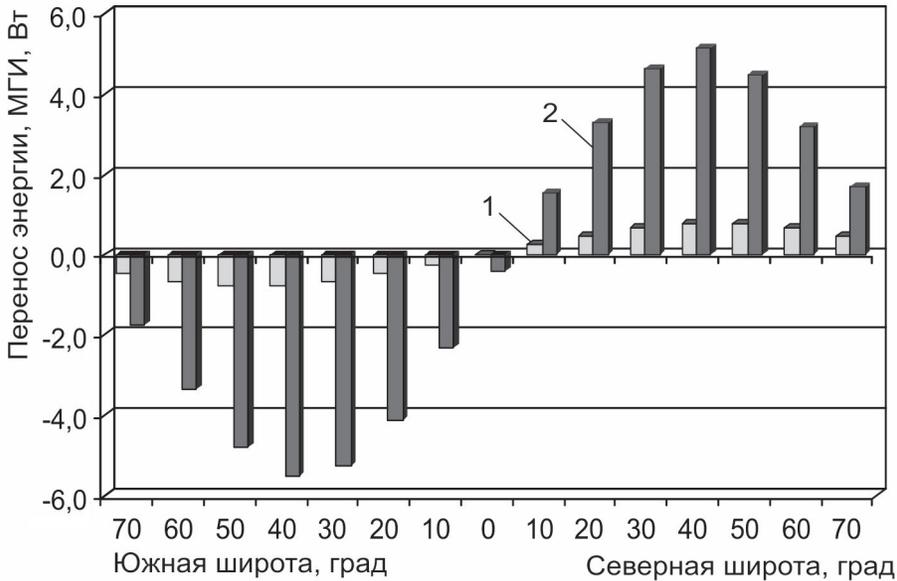


Рис. 11. Среднее многолетнее значение меридионального градиента инсоляции (1) и среднего годового переноса энергии в системе «океан—атмосфера» (2) [48], в 10^{15} Вт.

Fig. 11. Average long-term value of meridional insolation gradient (1) and average annual energy transfer in the ocean—atmosphere system (2) [48] in 10^{15} W.

полушарии), то к годовым зонам неустойчивости (вблизи 65° в каждом полушарии) приурочены области максимального развития внетропических циклонов. 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. — 15×10^{12} Вт или 15 ТВт). Ежегодно в северном полушарии насчитывается от 60 до 70 тропических циклонов, а в южном полушарии из-за большей однородности подстилающей поверхности всего 5—10. Вероятно, с максимальными изменениями МГИ в отмеченных зонах неустойчивости 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 [9], Э. Пальмена и Ч. Ньютона [48] (рис. 11). Коэффициент корреляции между средними значениями годового МГИ и значениями переноса энергии в системе «океан—атмосфера» составил 0,98 (линейная связь). При этом численные значения переноса энергии в системе «океан—атмосфера» в работах [9, 48] в среднем в 6—7 раз превосходят значения

МГИ, что связано с участием в переносе энергии в системе «океан—атмосфера» таких агентов переноса энергии как водные и воздушные массы. В других работах значения переноса энергии приблизительно в 3—5 раз превышают значения годового МГИ [47, 49].

Поскольку перенос энергии в системе «океан—атмосфера» определяется МГИ, то полученные для него особенности должны проявляться и в 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, сглаживание сезонных различий и особенности изменения МГИ — связаны с уменьшением наклона оси вращения Земли [12, 44].

В результате корреляционного анализа определена связь многолетних изменений аномалии годовых и сезонных ПТВ и ТПО Земли, Мирового океана и полушарий с многолетними изменениями годовой инсоляционной контрастности (ИК). Для полушарий годовая ИК рассчитывалась, по полученным значениям инсоляции, как разность солнечной радиации, приходящей в широтную область $0—45^\circ$ (источник тепла) и $45—90^\circ$ (сток тепла) за год. Для Земли в качестве ИК принималось среднее годовое значение ИК, полученное для полушарий [12, 50, 51]. Инсоляционная контрастность, таким образом, обобщенно, по областям источника и стока тепла, отражает изменения МГИ. Многолетние изменения ИК (как и МГИ) линейно связаны с изменением угла наклона оси вращения Земли. Коэффициент корреляции составляет $-0,998$. Угол наклона оси уменьшился в период с 1900 по 2016 г. на $0,015^\circ$, ИК возросла на $0,7 \text{ Вт/м}^2$. ПТВ и ТПО увеличились за это время приблизительно на 1 и $0,9^\circ\text{C}$ соответственно.

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 [12, 50, 51]. Значения коэффициента детерминации составляют от 0,693 до 0,862 (тренды — полиномы второй степени). Коэффициент детерминации показывает долю дисперсии ПТВ и ТПО, определяемую трендом. Следовательно, чтобы объяснить тенденции многолетних изменений глобальной температуры, следует выявить фактор, определяющий тренды в исходных рядах ПТВ и ТПО. Из анализа их изменчивости следует, что многолетние изменения ТПО и ПТВ Земли и полушарий характеризуются тесными положительными корреляционными связями с многолетними изменениями ИК и отрицательными с многолетними изменениями угла наклона оси. Выполненные по уравнению регрессии (по ансамблю линейных и полиномиальных решений) расчеты показали, что многолетние изменения ПТВ и ТПО более, чем на 2/3 определяются многолетними изменениями годовой инсоляционной контрастности (табл. 1).

Кроме того, в результате построения регрессионных моделей было выявлено значимое влияние ИК на многолетнюю изменчивость следующих характеристик: уровень Мирового океана [12], среднегодовая и минимальная площадь морских льдов в северном полушарии и Северном Ледовитом океане [52, 53], суммарный баланс массы льда в ледниковых районах северного полушария [54].

Таблица 1

Многолетние изменения ПТВ и ТПО, объясняемые регрессионной моделью [12]
в зависимости от инсоляционной контрастности
и атлантической мультideкадной осцилляции (АМО), %

Long-term changes in SAT and SST, explained by the regression model [12],
depending on insolation contrast and Atlantic multi-decadal oscillations, %

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

Примечание: АМО имеет период около 60 лет.

Таким образом, определяются естественные причины изменения современного глобального климата. Основными причинами являются изменение наклона оси вращения Земли, регулирующее распределение приходящей к Земле солнечной радиации по широтам и сезонам, а также интенсивность меридионального теплообмена — меридионального переноса радиационного тепла или работы «тепловой машины первого рода» [12, 51].

Физический механизм найденной 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 обобщенном виде может быть выражен следующим образом. 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 и вихревыми образованиями в атмосфере из низких широт в высокие. Следует учесть, что площади областей стока тепла в полушариях приблизительно в 2,7 раза меньше площади областей его источников. Следовательно, 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. Увеличение температуры в областях стока тепла, последующее увеличение испарения и содержания водяного пара в атмосфере, создающее дополнительное тепло за счет увеличения парникового

эффекта, представляет 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, вероятно, 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 засушливых периодов.

Следует отметить, что из-за различий в полушариях (северное полушарие более континентальное, чем южное) эволюция климата в них несколько отличается. Так, во-первых, вихревых образований (тропических и внетропических циклонов) в северном полушарии больше, чем в южном полушарии, в котором подстилающая поверхность более однородна. Во-вторых, в южном полушарии меридиональный перенос тепла заметно блокируется зональной циркуляцией — «ревушие сороковые» в атмосфере и антарктическим циркумполярным течением в океане. Поэтому процессы потепления более заметно проявляются в северном полушарии.

В рамках астрономической теории климата М. Миланковичем были сформулированы климатические эффекты, связанные с изменением астрономических характеристик (эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси) и имеющие периоды в десятки тысяч лет. Но эти эффекты, как отмечалось, справедливы только для солярного климата Земли. Отметим эффекты для глобального климата Земли, связанные с изменением инсоляционных характеристик и отражающие вариации переноса радиационного тепла — теплообмена.

1. Меридиональный перенос радиационного тепла — «тепловая машина первого рода» — определяется меридиональным градиентом инсоляции или инсоляционной контрастностью полушария. МГИ и ИК регулируются изменением наклона оси вращения Земли. Чем меньше угол наклона оси от перпендикуляра к плоскости эклиптики, тем интенсивнее меридиональный перенос радиационного тепла, и наоборот.

2. Межполушарный теплообмен. Определяется инсоляционной сезонностью Земли (ИСЗ), которая регулируется соотношением циклов прецессии и долготы перигелия. ИСЗ — разность летней инсоляции одного полушария и зимней инсоляцией другого. Чем больше разность летней инсоляции одного полушария и зимней инсоляции другого полушария, тем интенсивнее межполушарный теплообмен (полугодия здесь астрономические). Оценки перемещаемой массы воздуха в северном полушарии получены Н.С. Сидоренковым (для 1970—1974 гг.). В среднем из летнего полушария в зимнее переносится около 4×10^{18} г воздуха [4]. Межполушарный обмен составляет, таким образом, около 0,08 % от массы атмосферы. Однако, перенос радиационного тепла (воздушными и водными массами) из летнего полушария в зимнее со временем изменяется в связи с различием летней и зимней инсоляции в полушариях. Одно зимнее полушарие в результате межполушарного теплообмена может получать больше или меньше тепла, чем другое зимнее полушарие. Так, с максимумом межполушарного теплообмена и

максимумом зимней ИК в северном полушарии связан малый климатический оптимум голоцена [20].

3. Теплообмен в системе «океан—материк» («тепловая машина второго рода») определяется инсоляционной сезонностью полушария (ИСП), которая также регулируется соотношением прецессионного цикла (предварение равноденствий) с циклом долготы перигелия. Инсоляционная сезонность полушария рассчитывается как разность летней и зимней инсоляции в полушарии. Многолетние изменения в интенсивности этого теплообмена связаны с сезонной сменой областей источника и стока тепла. При сглаживании сезонных различий в инсоляции интенсивность теплообмена в системе «океан—материк» снижается и наоборот.

Отмеченные механизмы теплообмена (переноса радиационного тепла) определяются неравномерным поступлением и распределением солнечной радиации по сезонам и широтам. Неравномерность поступления и распределения инсоляции регулируется астрономическими характеристиками орбитального движения Земли и углом наклона оси вращения Земли, т. е. ее орбитального и вращательного движений.

Отмеченные механизмы переноса радиационного тепла действуют одновременно. Однако, интенсивность каждого из них определяется изменением регулирующих их интенсивность характеристик инсоляции связанных с орбитальным движением Земли и наклоном оси ее вращения. Эти механизмы теплообмена, связывающие многолетние изменения солярного и глобального климата, не учитывались в астрономической теории климата при объяснении изменений палеоклимата. Так, использование М. Миланковичем и некоторыми его последователями [15, 23, 29] калорических полугодий равной продолжительности исключает возможность учета межполушарного теплообмена и теплообмена в системе «океан—материк». В настоящее время разность продолжительности летнего и зимнего полугодия в полушариях составляет около 7,5 суток.

Таким образом, слабое пространственное и временное разрешение (математическая проблема) и неучет механизмов переноса радиационного тепла — теплообмена (физическая проблема) являются причинами ограничивающими применение астрономической теории климата в представленном М. Миланковичем и его последователями виде, как для моделирования палеоклимата, так и для объяснения изменений современного климата. Однако, увеличение пространственного и временного разрешения в расчетах инсоляции и учет, связанных с неравномерным поступлением солнечной радиации, механизмов переноса радиационного тепла, открывает возможности применения астрономической теории климата к объяснению изменений современного глобального климата Земли и глобальных климатических событий в позднем голоцене [12, 20, 55]. Решение математической и физической проблемы астрономической теории климата позволяет использовать ее модифицированную версию для объяснения причин изменения современного глобального климата. Модифицированная версия астрономическая теория климата названа нами солярной теорией изменения климата (или солярной теорией климата). Эта теория является результатом развития астрономической теории климата М. Миланковича [15, 17] и отличается от нее возможностью приложения

к исследованию и объяснению причин изменения современного солярного и глобального климата и климата позднего голоцена [12, 20, 44, 55]. Солярная теория климата также может стать ключом к объяснению изменений глобального климата Земли в плейстоцене. Однако, при этом следует учитывать и тектонический фактор, изменяющий очертания материков и океанов, их географическое положение и высотные отметки, а также изменение активности Солнца.

Заключение

Определена физическая основа моделирования, реконструкции и прогноза глобального климата Земли. Физическая основа связи солярного и глобального климата найдена благодаря решению математической проблемы астрономической теории климата — выполнению расчетов инсоляции с высоким пространственным и временным разрешением. Кроме вариаций приходящей радиации (годовой и сезонной) физическую основу составляют механизмы переноса радиационного тепла, связанные с неравномерным поступлением и распределением солнечной радиации. Неравномерность в поступлении и распределении радиационного тепла регулируется характеристиками орбитального движения Земли и углом наклона оси ее вращения. Так, меридиональный перенос радиационного тепла определяется меридиональным градиентом инсоляции, который регулируется изменением угла наклона оси вращения Земли. Межполушарный перенос радиационного тепла и теплообмен в системе океан—материк определяются инсоляционной сезонностью Земли и полушарий соответственно. Эти механизмы радиационного теплообмена регулируются соотношением циклов прецессии точки весеннего равноденствия и долготы перигелия.

Решение математической проблемы, выполнение высокоточных расчетов инсоляции и создание базы данных инсоляции создают возможность и для точного расчета радиационного баланса Земли, ее поверхности и атмосферы.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой Географического факультета МГУ «Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений» (121051100135-0).

Acknowledgment

This research was carried out within the frame of the state budgetary theme of the Geographical Faculty of MSU «Paleoclimates, evolution of the natural environment and long-term forecast of its changes».

Список литературы

1. Кондратьев К.Я. Глобальный климат и его изменения. Л.: Наука, 1987. 232 с.
2. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физических наук. 2000. Т. 170, № 4. С. 419—445.

3. Шулейкин В.В. Физика моря. М.: АН СССР, 1953. 990 с.
4. Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. 384 с.
5. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 11—26.
6. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Наумов Л.М. Влагосодержание атмосферы как климатообразующий фактор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 3. С. 243—251. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251.
7. Будыко М.И. Радиационные факторы современных изменений климата // Известия АН СССР. Серия географическая. 1968. № 5. С. 36—41.
8. Кондратьев К.Я. Радиационные факторы современных изменений глобального климата. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 279 с.
9. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 260 с.
10. Федоров В.М. Гравитационные факторы и астрономическая хронология геосферных процессов. М.: Московский университет, 2000. 368 с.
11. Федоров В.М. Астрономическая климатология. М.: Московский университет, 2002. 236 с.
12. Федоров В.М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. М.: Физматлит, 2018. 232 с.
13. Большаков В.А. Новая концепция орбитальной теории климата. М.: Московский университет, 2003. 256 с.
14. Имбри Д., Имбри К.П. Тайны ледниковых эпох. М.: Прогресс, 1988. 264 с.
15. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.—Л.: ГОНТИ, 1939. 208 с.
16. Berger A. Long-term variation of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements // Quat. Res. 1978. V. 9. P. 139—167.
17. Milankovitch M. Theorie Mathematique des Phenomenes Thermiques produits par la Radiation Solaire. Paris: Gauthier-Villars et Cie, 1920. 339 p.
18. Федоров В.М. Периодические возмущения и малые вариации солярного климата Земли // Доклады РАН, 2014. Т. 457: № 2. С. 222—225. doi: 10.7868/S0869565214200213.
19. Федоров В.М., Фролов Д.М. Пространственная и временная изменчивость приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации // Космические исследования. 2019. Т. 57: № 3. С. 177—184.
20. Федоров В.М., Гребенников П.Б. Малый (средневековый) климатический оптимум голоцена и его возможные причины // Жизнь Земли. 2020. Т. 42: № 4. С. 395—405.
21. Fedorov V.M. Features of the Earth's Solar Climate Changes in the Present Epoch // Geomagnetism and Aeronomy. 2020. P. 993—998. doi: 10.1134/S0016793220070117.
22. Brouwer D., Van Woerkom A.J.J. The secular variation of the orbital elements of the principal planets // Astronomical Papers. 1950. V. 13. P. 81—107.
23. Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Вековые изменения орбиты Земли и астрономическая теория колебаний климата // Труды Института теоретической астрономии АН СССР. 1969. Вып. 14. С. 48—84.
24. Мельников В.П., Смутьский И.И. Астрономическая теория ледниковых периодов: Новые приближения. Решенные и нерешенные проблемы. Новосибирск: ГЕО, 2009. 98 с.
25. Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years? // Quatern. Sci. Rev. 1991. V. 10. P. 297—317.
26. Laskar J., Joutel F., Boudin F. Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from –20 Myr to +10 Myr // Astron. and Astrophys. 1993. V. 287. P. 522—533.
27. Федоров В.М., Костин А.А. Вычисление инсоляции Земли для периода от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э. // Процессы в геосредах. 2019. № 2. С. 254—262.
28. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's Insolation for the Period 3000 BC—AD 2999 Processes in GeoMedia. 2020. V. I. Springer Geology (Cham: Springer International Publishing). P. 181—192. doi: 10.1007/978-3-030-38177-6_20.
29. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 246 с.
30. Vernekar A. Long-period global variations of incoming solar radiation // Series: Meteorological Monographs. American Meteorological Society. 1972. V. 12. № 34. 128 p.

31. *Cionco R.G., Soon W.W.-H.* Short-Term Orbital Forcing: A Quasi-Review and a Reappraisal of Realistic Boundary Conditions for Climate Modeling // *Earth-Science Reviews*. 2017. V. 166. P. 206—222.
32. Будыко М.И. Изменение климата. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 280 с.
33. Федоров В.М. Проблема меридионального переноса тепла в астрономической теории климата // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18, № 3. С. 117—128. doi: 10.21455/GPB1019.3-8.
34. *Imbrie J., Berger A., Boyle E.A., Clemens S.C., Duffy A., Howard W.R., Kukla G., Kutzbuch J., Martinson D.G., McIntyre A., Mix A.C., Molfino B., Mmorley J.J., Peterson L.C., Piasias N.G., Prell W.L., Raymo M.E., Shackleton N.J., Toggweiler J.R.* On the structure and origin of major glacial cycles, 2. The 100,000-year cycle // *Paleoceanology*. 1993. V. 8. P. 699—735.
35. *Borisenkov E.P., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V.* On some characteristics of insolation changes in the past and the future // *Climatic Change*. 1983. № 5. P. 237—244.
36. *Berger A., Loutre M.F., Yin Q.* Total irradiation during any time interval of the year using elliptic integrals // *Quaternary science reviews*. 2010. V. 29. P. 1968—1982. doi: 10.1016/j.quascirev.2010.05.07.
37. *Bertrand C., Loutre M.F., Berger A.* High frequency variations of the Earth's orbital parameters and climate change // *Geophysical research letters*. 2002. V. 29, № 18. P. 40-1—40-3. doi: 10.1029/2002GL015622.
38. *Loutre M.F., Berger A., Bretagnon E., Blanc P.-L.* Astronomical frequencies for climate research at the decadal to century time scale // *Climate dynamics*, 1992. V. 7. P. 181—194.
39. *Standish E.M.* JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405, JPL Interoffice Memorandum, 1998. 312.F-98-048.
40. *Kopp G., Lean J.* A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophysical Research Letters*. 2011. V. 37. L01706. doi: 10.1029/2010GL045777.
41. *Bretagnon P.* Theorie du mouvement de l'ensemble des planetes. Solution VSOP82 // *Astronomy and Astrophysics*. 1982. V. 114. P. 278—288.
42. NASA. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ssd.jpl.nasa.gov> — Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). Дата обращения: 12.06.20.
43. Федоров В.М., Костин А.А., Фролов Д.М. Влияние формы Земли на характеристики ее облучения // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19, № 3. С. 119—130. doi: 10.21455/GPB2020.3-7.
44. Федоров В.М. Эволюция современного глобального климата Земли и ее возможные причины // *Геориск*. 2020. Т. 14, № 4. С. 16—29. doi: 10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29.
45. *Cionco R.G., Soon W.W.-H., Quaranta N.E.* On the calculation of latitudinal insolation gradients throughout the Holocene // *Advances in Space Research*. 2020. V. 66. P. 720—742.
46. *Davis B.A.S., Brewer S.* Orbital forcing and role of the latitudinal insolation/temperature Gradient // *Clim. Dyn.*, 2009. V. 32. P. 143—165. doi: 10.1007/s00382-008-0480-9.
47. *Trenberth K.E., Caron J.M.* Estimates of Meridional Atmosphere and Ocean Heat Transports // *American Meteorological Society*, 2001. V. 14. P. 3433—3443.
48. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 616 с.
49. *Reichelt J.P., Oort A.H.* Physics of climate. *Rev. Modern Phys.* 1984. V. 56, № 3. P. 365—429.
50. Федоров В.М. Корреляционный анализ инсоляции Земли и аномалии приповерхностной температуры // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. № 45. С. 151—168.
51. Федоров В.М. Контрастность годовых инсоляционных температур и тенденции многолетних изменений приповерхностной температуры воздуха // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского — Природного заповедника РАН. 2020. Вып. 1 (13). С. 64—76.
52. Федоров В.М. Тенденции изменения площади морских льдов в Северном полушарии и их причины // *Криосфера Земли*. 2015. Т. XIX, № 3. С. 52—64.
53. Федоров В.М., Гребенников П.Б., Фролов Д.М. Оценка роли инсоляционного фактора в изменениях площади морских льдов в российской Арктике // *Криосфера Земли*. 2020. Т. 24, № 3. С. 38—50. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-3(38-50)
54. Федоров В.М. Прогноз изменения баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария // *Криосфера Земли*. 2018. Т. XXII. № 4. С. 55—64. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(55-64).
55. Федоров В.М., Фролов Д.М. Малый ледниковый период в жизни Земли и его возможные причины // *Жизнь Земли*, 2020. Т. 42, № 1. С. 4—12. doi:10.29003/m875.0514-7468.2020_42_1/4-12.

Reference

1. Kondrat'ev K.Ya. *Global'nyj klimat i ego izmeneniya*. The global climate and its changes. Leningrad: Science, 1987: 232 p. [In Russian].
2. Monin A.S., Shishkov Yu.A. Climate as a problem of physics. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. Advances in physical sciences. 2000, 170, 4: 419—445. [In Russian].
3. Shulejkin V.V. *Fizika morya*. Physics of the sea. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1953: 990 p. [In Russian].
4. Sidorenkov N.S. *Fizika nestabil'nostej vrashcheniya Zemli*. Physics of Earth Rotation Instabilities. Moscow: Fizmatlit, 2002: 384 p. [In Russian].
5. Alekseev G.V. Manifestation and intensification of global warming in the Arctic. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2015, 1: 11—26. [In Russian].
6. Malinin V.N., Gordeeva S.M., Naumov L.M. Total precipitable water of the atmosphere as a climate forcing factor. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Current problems in remote sensing of the earth from space. 2018, 15(3): 243—251. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251. [In Russian].
7. Budyko M.I. Radiation factors of modern climate change. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya*. Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geographic series. 1968, 5: 36—41. [In Russian].
8. Kondrat'ev K.Ya. *Radiacionnye faktory sovremennykh izmenenij global'nogo klimata*. Radiation factors of modern changes in the global climate. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980: 229 p. [In Russian].
9. Lorenc E.N. *Priroda i teoriya obshchej cirkulyacii atmosfery*. The nature and theory of the general circulation of the atmosphere. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970: 260 p. [In Russian].
10. Fedorov V.M. *Gravitacionnye faktory i astronomicheskaya hronologiya geosfernykh processov*. Gravitational factors and astronomical chronology of geospheric processes. Moscow: Moscow University Publishing House, 2000: 368 p. [In Russian].
11. Fedorov V.M. *Astronomicheskaya klimatologiya*. Astronomical climatology. Moscow: Moscow University Publishing House, 2002: 236 p. [In Russian].
12. Fedorov V.M. *Insoliatсия Zemli i sovremennye izmeneniia klimata*. Earth's insolation and modern climate changes. Moscow: Fizmatlit, 2018: 232 p. [In Russian].
13. Bol'shakov V.A. *Novaya koncepciya orbital'noj teorii klimata*. New concept of the orbital theory of climate. Moscow: Moscow University, 2003: 256 p. [In Russian].
14. Imbri D., Imbri K.P. *Tajny lednikovyh epoh*. Secrets of the ice ages. Moscow: Progress, 1988: 264 p. [In Russian].
15. Milankovich M. *Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebanij klimata*. Mathematical climatology and astronomical theory of climate fluctuations. Moscow—Leningrad: State United Scientific and Technical Publishing House, 1939: 208 p. [In Russian].
16. Berger A. Long-term variation of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements. *Quaternary Research*, 1978, 9: 139—167.
17. Milankovitch M. *Theorie Mathematique des Phenomenes Thermiques produits par la Radiation Solaire*. Paris: Gauthier-Villars et Cie, 1920: 339 p.
18. Fedorov V.M. Periodic disturbances and small variations in the solar climate of the earth. *Doklady RAN*. Reports of the Russian Academy of Sciences, 2014, 457 (2): 222—225. doi: 10.7868/S0869565214200213. [In Russian].
19. Fedorov V.M., Frolov D.M. Spatial and temporal variability of solar radiation arriving at the upper boundary of the atmosphere. *Kosmicheskie issledovaniya*. Cosmic research. 2019, 57 (3): 177—184. [In Russian].
20. Fedorov V.M., Grebennikov P.B. Small (medieval) climatic optimum of the Holocene and its possible causes. *Zhizn' Zemli*. Life of the Earth. 2020, 42 (4): 395—405. [In Russian].
21. Fedorov V.M. Features of the Earth's Solar Climate Changes in the Present Epoch. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020, 60(7): 993—998. doi: 10.1134/S0016793220070117.
22. Brouwer D., Van Woerkom A.J.J. The secular variation of the orbital elements of the principal planets. *Astronomical Papers*. 1950, 13: 81—107.

23. Sharaf Sh.G., Budnikova N.A. Secular changes in the Earth's orbit and the astronomical theory of climate fluctuations. *Trudy Instituta teoreticheskoy astronomii AN SSSR*. Proceedings of the Institute of Theoretical Astronomy of the USSR Academy of Sciences. 1969, 14: 48—84. [In Russian].
24. Mel'nikov V.P., Smul'skij I.I. *Astronomicheskaya teoriya lednikovyh periodov: Nove priblizheniya. Reshennyye i nereshennyye problemy*. Astronomical theory of ice ages: New approximations. Resolved and Unresolved Issues. Novosibirsk: GEO, 2009: 98 p. [In Russian].
25. Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years? *Quaternary Science Reviews*. 1991, 10: 297—317.
26. Laskar J., Joutel F., Boudin F. Orbital, precessional and insolation quantities for the Earth from –20 Myr to +10 Myr. *Astronomy and Astrophysics*. 1993, 287: 522—533.
27. Fedorov V.M., Kostin A.A. Calculation of the Earth's insolation for the period from 3000 BC before 2999 AD. *Processy v geosredah*. Processes in geomedial, 2019, 2: 254—262. [In Russian].
28. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's Insolation for the Period 3000 BC—AD 2999. *Processes in GeoMedia*. Springer Geology (Cham: Springer International Publishing). 2020, 1: 181—92. doi: 10.1007/978-3-030-38177-6_20.
29. Monin A.S. *Vvedenie v teoriyu klimata*. Introduction to climate theory. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982: 246 p. [In Russian].
30. Vernekar A. Long-period global variations of incoming solar radiation. Series: Meteorological Monographs. American Meteorological Society. 1972, 12(34): 128 p.
31. Cionco R.G., Soon W.W.-H. Short-Term Orbital Forcing: A Quasi-Review and a Reappraisal of Realistic Boundary Conditions for Climate Modeling. *Earth-Science Reviews*. 2017, 166: 206—222.
32. Budyko M.I. *Izmenenie klimata*. Changing of the climate. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974: 280 p. [In Russian].
33. Fedorov V.M. The problem of meridional heat transfer in the astronomical theory of climate. *Geofizicheskie processy i biosfera*. Geophysical Processes and the Biosphere. 2019, 18 (3): 117—128. doi: 10.21455/GPB1019.3-8 [In Russian].
34. Imbrie J., Berger A., Boyle E.A., Clemens S.C., Duffy A., Howard W.R., Kukla G., Kutzbuch J., Martinson D.G., McIntyre A., Mix A.C., Molfino B., Morley J.J., Peterson L.C., Pisias N.G., Prell W.L., Raymo M.E., Shackleton N.J., Toggweiler J.R. On the structure and origin of major glacial cycles, 2. The 100,000-year cycle. *Paleoceanology*. 1993, 8: 699—735.
35. Borisenkov E.P., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V. On some characteristics of insolation changes in the past and the future. *Climatic Change*. 1983, 5: 237—244.
36. Berger A., Loutre M.F., Yin Q. Total irradiation during any time interval of the year using elliptic integrals. *Quaternary science reviews*. 2010, 29: 1968—1982. doi: 10.1016/j.quascirev.2010.05.07.
37. Bertrand C., Loutre M.F., Berger A. High frequency variations of the Earth's orbital parameters and climate change. *Geophysical research letters*. 2002, 29 (18): 40-1—40-3. doi: 10.1029/2002GL015622.
38. Loutre M.F., Berger A., Bretagnon E., Blanc P.-L. Astronomical frequencies for climate research at the decadal to century time scale. *Climate dynamics*. 1992, 7: 181—194.
39. Standish E.M. JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405. JPL Interoffice Memorandum. 1998. 312.F-98-048.
40. Kopp G., Lean J. A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*. 2011, 37: L01706. doi: 10.1029/2010GL045777.
41. Bretagnon P. Theorie du mouvement de l'ensemble des planetes. Solution VSOP82. *Astronomy and Astrophysics*. 1982, 114: 278—288.
42. NASA. Available at: <http://ssd.jpl.nasa.gov> — Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). (accessed 12.06.20).
43. Fedorov V.M., Kostin A.A., Frolov D.M. Influence of the Earth's shape on the characteristics of its irradiation. *Geofizicheskie processy i biosfera*. Geophysical Processes and Biosphere, 2020, 19 (3): 119—130. doi: 10.21455/GPB2020.3-7. [In Russian].
44. Fedorov V.M. Evolution of the modern global climate of the earth and its possible causes. *Georisk*. Georisk. 2020, 14 (4): 16—29. doi: 10.25296/1997-8669-2020-14-4-16-29. [In Russian].
45. Cionco R.G., Soon W.W.-H., Quaranta N.E. On the calculation of latitudinal insolation gradients throughout the Holocene. *Advances in Space Research*. 2020, 66: 720—742.

46. *Davis B.A.S., Brewer S.* Orbital forcing and role of the latitudinal insolation/temperature Gradient. *Climate Dynamics*. 2009, 32: 143—165. doi: 10.1007/s00382-008-0480-9.
47. *Trenberth K.E., Caron J.M.* Estimates of Meridional Atmosphere and Ocean Heat Transports. *American Meteorological Society*. 2001, 14: 3433—3443.
48. *Pal'men E., N'yuton Ch.* *Cirkulyacionnye sistemy atmosfery*. Atmospheric circulation systems. Lenin-grad: Gidrometeoizdat, 1973: 616 p. [In Russian].
49. *Peixoto J.P., Oort A.H.* Physics of climate. *Reviews of Modern Physics*, 1984, 56 (3): 365—429.
50. *Fedorov V.M.* Correlation analysis of ground insolation and near-surface temperature. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2016, 45: 151—168. [In Russian]
51. *Fedorov V.M.* Contrast of annual insolation temperatures and trends of long-term variations in near-surface air temperature. *Trudy Karadagskoj nauchnoj stancii im. T.I. Vyazemskogo — Prirodnogo zapovednika RAN*. Proceedings of the Karadag Scientific Station named after T.I. Vyazemsky — Natural Reserve of the Russian Academy of Sciences, 2020, 1 (13): 64—76. [In Russian].
52. *Fedorov V.M.* Trends in the area of sea ice in the Northern Hemisphere and their causes. *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2015, 19(3): 52—64. [In Russian].
53. *Fedorov V.M., Grebennikov P.B., Frolov D.M.* Assessment of the role of the insolation factor in changes in the area of sea ice in the Russian Arctic. *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2020, 24 (3): 38—50. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-3(38-50). [In Russian].
54. *Fedorov V.M.* Forecast of changes in the ice mass balance in the glacial regions of the Northern Hemisphere. *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2018, 22(4): 55—64. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(55-64). [In Russian].
55. *Fedorov V.M., Frolov D.M.* The Little Ice Age in the Life of the Earth and Its Possible Causes. *Zhizn' Zemli*. Life of the Earth. 2020, 42(1): 4—12. doi:10.29003/m875.0514-7468.2020_42_1/4-12. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 11.06.2021

Принята к публикации после доработки 19.08.2021

Сведения об авторе

Федоров Валерий Михайлович, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (географический ф-т), fedorov.msu@mail.ru, 8 (916) 243 57 00.

Information about author

Fedorov Valery Mikhailovich, PhD (Geogr. Sci.), Leading Researcher, Lomonosov Moscow State University, fedorov.msu@mail.ru, 8 (916) 243 57 00.