

## Вариации инсоляции Земли и особенности их учёта в физико-математических моделях климата

В.М. Фёдоров

*Приводится обзор исследований многолетних вариаций инсоляции Земли, связанных с небесно-механическими процессами. На основе аналитического обзора результатов расчёта инсоляции Земли определены общие проблемы в физико-математическом моделировании климата.*

**Ключевые слова:** инсоляция Земли, орбитальное движение, вариации, климат Земли, климатические модели

PACS numbers: 92.70.Gt, 92.70.Np, 92.70.Qr

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.12.038267>

### Содержание

1. Введение (33).
2. Вековые (низкочастотные) вариации инсоляции (история развития астрономической теории климата) (33).
3. Периодические (высокочастотные) вариации инсоляции (38).
4. Общие проблемы учёта вариаций приходящей солнечной радиации в физико-математических моделях климата (43).
  - 4.1. Входной энергетический сигнал.
  - 4.2. Соотношение вариаций разной физической природы в изменчивости TSI.
  - 4.3. Изменение переноса энергии на ВГА.

Список литературы (45).

### 1. Введение

Климат — это состояние природной среды (системы), которое характеризуется усреднёнными по времени для некоторого района (или Земли) гидрометеорологическими, почвенно-биологическими и другими показателями. Проблема изменения современного глобального климата и, прежде всего, его температурных характеристик представляется актуальной для современной науки и практики [1]. Эта проблема определяется необходимостью прогнозирования последствий климатических изменений для природной среды и общества. Наиболее важным в проблеме исследования и прогнозирования изменений климата является вопрос о причинах, вызывающих эти изменения [2–4].

Солнечной радиацией определяется радиационный, тепловой баланс Земли и её климат [4, 5–10]. Лучистая энергия Солнца является основным источником энергии гидрометеорологических и многих других процессов, происходящих в атмосфере, гидросфере и на земной поверхности. Поэтому изучение пространственных и временных изменений приходящей к Земле радиации имеет

важное значение для исследования причин изменения климата и прогнозирования его изменений.

Годовой приход солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы Земли (ВГА) в среднем составляет  $5,49 \times 10^{24}$  Дж [11–13]. Этот приход не является постоянным во времени, он подвержен межгодовым и многолетним (вековым и периодическим) вариациям. Вариации приходящей к Земле лучистой энергии в основном определяются двумя причинами, имеющими различную физическую природу. Одной из причин является изменение активности излучения Солнца. Другой причиной, определяющей изменение приходящей к Земле энергии, являются небесно-механические процессы, вызывающие изменения элементов земной орбиты [4, 14–16] и наклона оси вращения. В настоящей работе рассматривается история изучения вариаций, связанных с небесно-механическими процессами, анализируется современное состояние этого вопроса и основные проблемы, связанные с учётом инсоляции при моделировании изменений климата.

В истории исследований изменений инсоляции Земли, связанных с небесно-механическими процессами, можно выделить два основных этапа. Один — более ранний и более продолжительный — отражает исследования низкочастотных (вековых) вариаций и связан с необходимостью объяснения причин изменения палеоклимата. Другой этап начался относительно недавно. Он определяется исследованием высокочастотных (периодических) вариаций инсоляции Земли в связи с поисками причин изменения современного климата.

### 2. Вековые (низкочастотные) вариации инсоляции (история развития астрономической теории климата)

Вариации солнечной радиации, связанные с небесно-механическими процессами, определяются расчётными методами. Под солярным климатом Земли понимается рассчитываемое теоретически поступление и распределение солнечной радиации на ВГА или на поверхности Земли без учёта атмосферы [12, 14]. При изучении вековых (низкочастотных) вариаций солнечного потока учитываются подверженные вековым возмущениям такие астрономические элементы земной орбиты, как

В.М. Фёдоров, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы 1, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: fedorov.msu@mail.ru

Статья поступила 14 сентября 2017 г.,  
после доработки 21 ноября 2017 г.

долгота перигелия и эксцентриситет, а также наклон оси вращения Земли, имеющие весьма значительные по продолжительности периоды вариаций [14, 16–22].

История изучения вековых (низкочастотных) вариаций солнечной радиации, определяемых небесно-механическими процессами, отражает развитие исследований, относящихся к астрономической теории климата [4, 11, 16, 23–30]. Появлению астрономической теории климата предшествовало развитие представлений о распространении покровных оледенений в истории Земли. Астрономическая теория климата возникла как необходимость объяснения и физического обоснования ледниковой теории.

Начало истории астрономической теории климата относится к середине XIX века 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 [31]. Согласно представлениям Ж. Адемара, ледниковые климаты были функцией 22000-летнего цикла прецессии, и оледенения происходили поочередно через каждые 11000 лет, охватывая то одно полушарие, то другое в зависимости от того, на какое из них приходился период продолжительных зимних сезонов (зимний сезон совпадал с положением Земли вблизи афелия). Основополагающая идея Ж. Адемара о том, что северное и южное полушария Земли нагреваются и охлаждаются поочередно, была подвергнута сомнению немецким географом А. Гумбольдтом и английским астрономом Дж. Гершелем. А. Гумбольдт, например, справедливо отмечал, что средняя температура любого из полушарий определяется не числом часов (суток) тёплого и холодного сезонов года, а количеством калорий солнечной энергии, которое оно получает за год [32]. Тем не менее предположение Ж. Адемара о связи возможных климатических изменений с определёнными астрономическими явлениями (предварение равноденствий) стало основой для дальнейшего развития представлений об астрономических факторах изменения климата [14, 20, 21, 25, 26, 33–35].

Представления о связи периодов распространения древних оледенений с астрономическими механизмами получили развитие в работах шотландского учёного Д. Кролля [14, 36, 37]. В качестве основополагающего астрономического фактора в представлениях Д. Кролля (наряду с прецессионным циклом) принимается изменчивость эксцентриситета земной орбиты. Используя формулы У. Леверье [38], 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 проведённых расчётов им был определён циклический характер вариаций эксцентриситета. Анализируя полученные данные, Д. Кролля пришёл 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 Землёй за год, практически не зависит от изменений эксцентриситета её орбиты. Однако Д. 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,

учёт влияния альбедо и положительных обратных связей [14, 25, 26, 33–35, 39, 40]. Представления Д. Кролля, в основе которых лежали два астрономических фактора: прецессионный цикл и периодическое изменение формы земной орбиты, были опубликованы в *Философском журнале* в 1864 г.

Вековые колебания приходящей к Земле солнечной радиации в виде математической задачи были рассмотрены в работах Л. Мича [41]. Им были получены формулы, связывающие поступающую радиацию (для любой широты) с вековыми колебаниями эксцентриситета, долготы перигелия и наклона эклиптики. Р. Болль [42] придал теории Д. Кролля математическую форму при учёте 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 Е. Кельверуэлла [43, 44], Р. Хэргривса [45], Н. Эхольма [46], но математическая часть задачи наиболее детально исследована в работах М. Миланковича [14, 16, 24–26, 33–35, 39, 40, 47].

Таким образом, к концу XIX века было известно, что распределение инсоляции по поверхности Земли (точнее, земного шара, без учёта атмосферы) зависит от трёх 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 века появились работы немецкого математика Л. Пильгрима, в которых были изложены результаты новых расчётов этих астрономических характеристик ("Опыт числовой разработки проблемы ледниковых периодов") за период времени в 1010 тысячелетий до 1850 г. н.э. [48]. В связи с этим расчёт количества поступающей солнечной энергии стал принципиально возможным.

Расчёты вековых изменений астрономических элементов Л. Пильгрима (за 600000 лет) были позже выполнены В. Мишковичем (директором Астрономической обсерватории в Белграде). Эти данные стали основой для расчётов М. Миланковичем вековых вариаций инсоляции Земли. В своих расчётах В. Мишкович исходил из вычислений орбитальных характеристик и масс планет, выполненных У. Леверье. Л. Пильгрим использовал данные Ж. Стоквелла [49], уступающие по точности расчётам У. Леверье. Точность в расчётах В. Мишковича составляла для эксцентриситета до четырёх десятичных знаков, для наклона эклиптики до нескольких секунд, для долготы перигелия до нескольких минут для периода времени по меньшей мере 100000 лет до и после эпохи, относящейся к началу 1800 г.

Следует, однако, отметить, что в то время С. Ньюкомбом [50] были составлены чрезвычайно точные таблицы движения планет (учитывающие Уран, Нептун и некоторые спутники планет), которые использовались в астрономии до середины XX века, однако М. Миланкович по тем или иным причинам в своих расчётах ими не воспользовался. Расчёты У. Леверье основывались на вековых возмущениях, рассчитанных Ж. Лагранжем [51]. Значения масс планет и те цифровые данные, которыми Ж. Лагранж воспользовался для установления начальных условий, были недостаточно точны (это отмечает и М. Миланкович). Из известных теперь девяти планет Лагранж мог учитывать только шесть. Уран был открыт (Дж. Гершелем в 1781 г.) во время выполнения расчётов Ж. Лагранжем, и элементы этой новой планеты не были

определены даже приблизительно. Ничего не было известно и о её спутниках. Нептун был открыт (на основе расчётов У. Леверье, связанных с возмущением в орбитальном движении Урана) только в 1846 г. Марс считался не имеющим спутников. Поэтому для определения масс двух планет (Марса и Урана) Ж. Лагранж мог опираться на грубо приближённые данные. Тем не менее ему удалось, хотя и приблизительно, определить границы, между которыми могут изменяться эксцентриситеты орбит планет и наклоны плоскостей их орбит к плоскости эклиптики. Принципиально важным в контексте данного обзора представляется полученный Лагранжем вывод о том, что большие полуоси орбит не подвергаются вековым изменениям, который позднее был включён П. Лапласом в теорему устойчивости Солнечной системы [52–55].

М. Миланковичем были определены климатические эффекты вековых вариаций трёх астрономических элементов: наклона эклиптики ( $\varepsilon$ ), эксцентриситета ( $e$ ) и долготы перигелия ( $P$ ). Так, увеличение наклона оси вращения Земли (относительно перпендикуляра к плоскости эклиптики) приводит к сокращению годовой суммы радиации в экваториальной области и её увеличению в полярных областях, т.е. происходит сглаживание различий между экваториальной областью и полярными районами. Уменьшение наклона приводит к обратным результатам, усиливая широтные контрасты в распределении солнечной радиации на земной поверхности (без учёта атмосферы). При  $\varepsilon = 0$ , когда оба полюса в течение всего года остаются неосвещёнными, широтные контрасты максимальны [14, 39]. Изменения наклона оси вращения имеют относительно правильный колебательный характер со средним периодом около 40000 лет. В течение этого периода широтные различия достигают один раз максимума (при наименьшем наклоне эклиптики), причём сезонные различия в это время достигают своего минимума, и один раз, через 20000 лет, минимума (при наибольшем наклоне эклиптики), когда сезонные различия выражены максимально. Эти явления повторялись бы периодически, если бы на них не накладывалось влияние других астрономических элементов [14, 39].

Годовой ход приходящей солнечной радиации также определяется продолжительностью летнего и зимнего сезонов (полугодий), которая является функцией двух элементов земной орбиты — эксцентриситета ( $e$ ) и долготы перигелия ( $P$ ). Вследствие изменчивости элементов  $e$  и  $P$  разность между приходящей радиацией в летний и зимний сезоны (полугодия) является функцией времени. Так, долгота перигелия приблизительно за 21000 лет увеличивается почти равномерно на  $360^\circ$ , так как перигелий за это время почти с одинаковой скоростью описывает полный круг. Величина эксцентриситета ( $e$ ) также испытывает колебания с периодом около 92000 лет (со значительно меньшей амплитудой), оставаясь заключённой между 0 и 0,0677. Изменение разности продолжительности летнего и зимнего сезонов зависит от обоих факторов ( $e$ ,  $P$ ), но влияние первого из них значительно сильнее. Вследствие этого величина разности (между приходами в летнее и зимнее время) колеблется около некоторого среднего значения с периодом в 21000 лет, а изменчивость амплитуды всех этих колебаний характеризуется периодом около 46000 лет [14, 39].

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

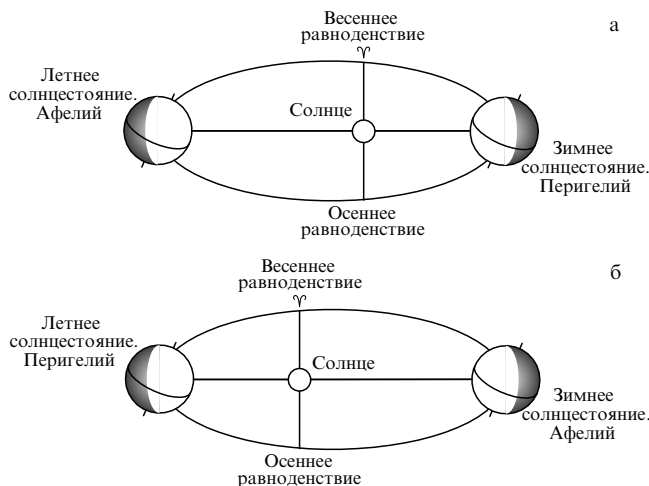


Рис. 1. Конфигурации Земли и Солнца: (а) при соединении перигелия с точкой зимнего солнцестояния (долгота перигелия  $90^\circ$ ), (б) при соединении перигелия с точкой летнего солнцестояния (долгота перигелия  $270^\circ$ ).

Разность продолжительности летнего и зимнего полугодий равна нулю только при долготе перигелия, равной  $0^\circ$  (перигелий совпадает с точкой весеннего равноденствия) и  $180^\circ$  (перигелий совпадает с точкой осеннего равноденствия; точки равноденствия — точки пересечения земной орбиты с плоскостью небесного экватора). При этом суммы приходящей за полугодия солнечной энергии равны как для полугодий, так и для полушарий. Широтные различия в поступающей на верхнюю границу атмосферы Земли радиации в этих случаях максимальны (рис. 1).

При увеличении долготы перигелия от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  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  $90^\circ$  (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 расчётам это событие имело место около 1250 г. н.э. Таким образом, сезонные контрасты в это время минимальные. Это верно, однако, только для северного полушария. В южном полушарии продолжительность летнего полугодия (совпадает с зимним полугодием в северном полушарии) сокращается, в то время как количество радиации, получаемой южным полушарием за такое короткое лето, равно тому количеству, которое получает северное полушарие за своё лето, более продолжительное. 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  $180^\circ$  (перигелий совпадает с точкой осеннего равноденствия), летнее и зимнее полугодия имеют одинаковую продолжительность в северном и южном полушариях. Суммы приходящей за полугодия солнечной энергии равны как для полугодий, так и для полушарий. Широтные различия в поступаю-

щей на верхнюю границу атмосферы Земли радиации в этих случаях максимальны. При долготе перигелия, равной  $270^\circ$  (перигелий совпадает с точкой летнего солнцестояния), продолжительность летнего полугодия в северном полушарии минимальна, и различие между летним и зимним сезонами (полугодиями) выражено 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 точках равноденствия 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 [14, 16, 24, 25, 33, 34].

На основе результатов расчётов вековых изменений астрономических элементов (выполненных В. Мишковицем) М. Миланковичем были рассчитаны значения летней инсоляции для параллели  $65^\circ$  северного полушария за последние 650000 лет. Полученный М. Миланковичем график инсоляции (в значениях широтных эквивалентов) впервые был опубликован в 1924 г. в работе В. Кёппена и А. Вегенера [56] *Климаты прошлого* (рис. 2). Под эквивалентными широтами для  $65^\circ$  с.ш. понимаются широты, на которых в настоящее время за летнее калорическое полугодие поступает столько же солнечной радиации, сколько в прошлом поступало на широте  $65^\circ$  с.ш. Увеличение эквивалентной широты означает сокращение поступающей радиации, и наоборот (например, поступающая на Землю солнечная радиация на  $65^\circ$  с.ш. 590000 лет назад характерна для широты  $72^\circ$  с.ш. в эпоху 1800 г.).

Вместо расчёта суммарной солнечной радиации 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 расчётах использовались канонические единицы (величина солнечной постоянной, равная  $2 \text{ кал мин}^{-1} \text{ см}^{-2}$  или  $1395,6 \text{ Вт м}^{-2}$ , соответствовала 1 канонической единице; продолжительность тропического года — 100000 каноническим единицам). В дальнейшем М. Миланковичем

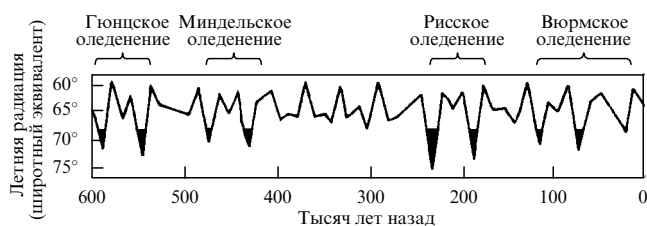


Рис. 2. Амплитуды вековых отклонений летних сумм радиации для  $65^\circ$  с.ш. в значениях широтных эквивалентов [14].

были рассчитаны вариации инсоляции для восьми параллелей, располагающихся между  $5^\circ$  и  $75^\circ$  северной широты. Основные результаты его исследований изложены в работе [14].

Расчёты, проведённые М. Миланковичем, в дальнейшем уточнялись рядом авторов. Их расчёты основывались на новых решениях теории вековых возмущений, полученных для всей Солнечной системы в 1950 г. Д. Брауэром и А. Ван Вуркомом [57]. При расчётах использовались последние данные о массах и движении планет, учитывались эффекты второго порядка, вызванные, например, долгопериодическими вариациями в движении Юпитера и Сатурна.

Детальные расчёты приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации провели советские астрономы Ш.Г. Шараф и Н.А. Будникова [17–19]. 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 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 наклона оси вращения происходили с периодами около 41 и 200 тыс. лет и определялись в пределах от  $22,068^\circ$  до  $24,568^\circ$ . Отклонения величины  $e \sin \Pi$  от значения в 1950 г. колебались в пределах от  $+0,03$  до  $-0,07$  со средним периодом около 21 тыс. лет. Вариации эквивалентных широт определялись интервалом  $58^\circ–79^\circ$  (довольно значительным) с преобладающими периодами в 41 тыс. лет и 1,2 млн лет. Построенные Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой графики хода эквивалентных широт приведены на рис. 3.

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

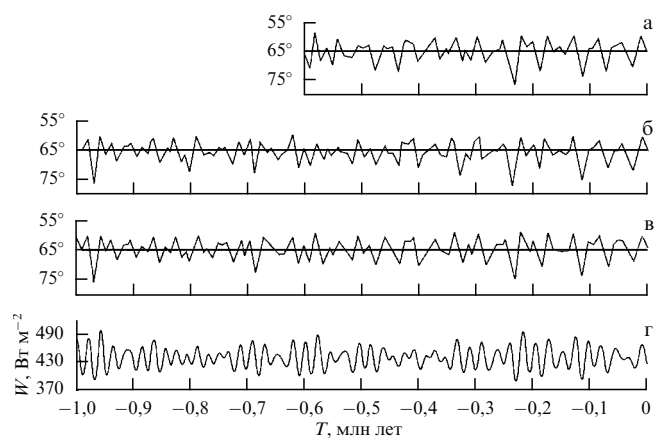


Рис. 3. Изменение инсоляции за летнее калорическое полугодие для широты  $65^\circ$  северного полушария по данным разных исследователей [28]: (а) [14], (б) [57], (в) [17], (г) [58]. По оси абсцисс отложено время в тысячах лет от 1950 г.; по оси ординат: (а–в) инсоляция в эквивалентных широтах в течение летнего полугодия, (г) среднемесячная инсоляция в июле  $W [\text{Вт м}^{-2}]$ .

относительно современной эпохи (начало 1950 г.) с шагом по времени 5 тыс. лет и по широте  $10^\circ$  [4, 16].

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  $2 \text{ кал мин}^{-1} \text{ см}^{-2}$  или  $1395,6 \text{ Вт м}^{-2}$ ),  $T_0$  — продолжительность тропического года (принимается постоянной),  $S$  — функция, описывающая распределение годовой инсоляции по меридиану,  $\varphi$  — географическая широта,  $\Pi$  — долгота перигелия,  $e$  — эксцентриситет,  $\varepsilon$  — наклон эклиптики. Из формулы (1) видно, что величины  $Q_{S,W}$  зависят от наклона оси  $\varepsilon$  и от элементов земной орбиты  $r_0$  (через  $I_0$  и  $T_0$ ),  $e$  и  $\Pi$  [16]. Расчёты с использованием формулы (1) показали, что аномалии инсоляции за калорические полугодия максимальны в летних полярных областях, где они достигают значений  $\pm 250 \text{ МДж м}^{-2}$ , и убывают в сторону зимних полярных районов. Отмечается, что изменение аномалий имеет квазипериодический характер с периодом около 40000 лет [4, 15, 16].

Также повторные расчёты вековых изменений элементов земной орбиты и инсоляции были выполнены А. Вернекарром [59]. Позднее А. Берже [20] 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 видно, что последний максимум в поступлении солнечной радиации для северного полушария отмечался около 10 тыс. лет назад (соответствует общим представлениям о времени деградации покровного оледенения в Европе и Северной Америке и приблизительно положению перигелия орбиты Земли в точке весеннего равноденствия). С этого времени происходит постепенное сокращение поступающей солнечной радиации, которое, по расчётам Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой, будет продолжаться ещё около 10 тыс. лет [17–19]. В это время перигелий земной орбиты будет располагаться вблизи точки весеннего равноденствия [60].

В наше время И.И. Смутьским и О.И. Кротовым предложен новый алгоритм расчёта инсоляции, основанный на точном решении задачи о движении двух тел (Земли и Солнца). Для отдельных широт Земли авторами рассчитана инсоляция за 200 тыс. лет, предшествующих настоящей эпохе (1950 г.). Отличия результатов выполненных расчётов не превышают 0,1% от результатов расчётов М. Миланковича [14], полученных для этого интервала [61]. Результаты, полученные И.И. Смутьским и О.И. Кротовым, как отмечают авторы, имеют хорошее совпадение с результатами Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой, но при этом наблюдаются заметные расхождения в экстремальных точках с результатами Ж. Ласкара с коллегами. Эти расхождения объясняются различием в начальных условиях расчёта инсоляции [17–19, 61]. В работах [20, 21] отмечается хорошее совпадение расчётных значений инсоляции, полученных А. Берже, с результатами расчётов, выполненных Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой [17–19].

Следует отметить, что при приближённом аналитическом решении задач, связанных с орбитальным движением, вводятся упрощения физического и математического характера (например, взаимодействующие тела рассматриваются как материальные точки или тела

определённой формы и т.д.). В связи с этим возможные ошибки при расчётах за большие периоды возрастают (поэтому М. Миланкович полагал, что надёжные результаты могут быть получены за период 600 тыс. лет). Ш.Г. Шараф и Н.А. Будникова уточнили исходные данные и прессионные решения, а также рассчитали инсоляцию на интервал 30 млн лет. А. Берже и М. Лутр выполнили расчёты для интервала в 5 и 3 млн лет [58, 62], Т. Кинн с коллегами рассчитали вариацию инсоляции на 3 млн лет [63]. Ж. Ласкар и его коллеги усовершенствовали теорию вековых возмущений и выполнили расчёты изменения инсоляции за время до 200 млн лет, но из-за проявления хаотичности в поведении основных характеристик пришли к выводу о том, что результаты можно считать достоверными только в пределах от 20 млн лет в прошлом до 10 млн лет в будущем [64–66]. Эти методики, программы расчёта [58, 62, 67] и данные инсоляции используются при численных экспериментах в палеоклиматическом моделировании.

В целом с историей развития астрономической теории климата связано получение серии расчётных значений вековых (низкочастотных) вариаций приходящей солнечной радиации (солярного климата Земли), определяемых вековыми вариациями элементов орбиты Земли (эксцентриситета, долготы перигелия) и наклона оси вращения. Количественные результаты расчёта вековых вариаций солнечной радиации у разных исследователей несколько различаются в связи с различиями в начальных условиях и способах расчётов (см. рис. 3). Однозначного решения проблемы глобальных климатических изменений (развития оледенений) с позиций астрономической теории климата получено не было. Корреляционные поиски связи периодов экстремальных величин в приходе радиации с периодами максимального развития оледенений и межледниковыми периодами без учёта влияния атмосферы, океана и других факторов на формирование глобального климата оказались неэффективными в отношении поисков причин его изменений [37, 68]. Осложняет объяснение развития оледенений вековыми вариациями солнечной радиации ряд иных явлений, например, метахронность оледенений [40, 69, 70], отсутствие оледенений в течение длительных геологических периодов (например, мелового). Таким образом, в масштабах геологического времени решающее значение могут иметь иные, кроме приходящей на верхнюю границу атмосферы солнечной радиации, климатообразующие факторы. Среди них, например, скорость вращения Земли, движение полюсов и материков, рельеф и очертания материков и океанов, траектории океанических течений, состав атмосферы и характер атмосферной циркуляции, вулканическая активность и др. [71–78]. Вариации солярного климата представляются приоритетным фактором климатообразования при анализе климатических изменений на непродолжительных временных интервалах, на которых влияние многих из отмеченных факторов (например, движение материков, полюсов, изменение очертаний материков и океанов) можно не учитывать (или считать постоянным).

Временной диапазон исследований, относящихся к астрономической теории климата, определяется изучением вековых (низкочастотных) вариаций солнечной радиации, что связано с основной задачей — объяснением глобальных климатических событий в геологических масштабах времени. В астрономической теории климата вековые вариации солнечной радиации рассчитываются в связи с вековыми возмущениями двух орбитальных элементов — эксцентриситета орбиты и долготы перигелия,

а также наклона оси вращения (или эклиптики). При этом считается, что "возмущения бывают двух родов: периодические, происходящие в чрезвычайно узких пределах, и вековые. Первые не оказывают почти никакого влияния на облучение Земли и поэтому для нас не представляют интереса" [14, с. 37]. Выполненные М. Миланковичем расчёты показывают, что "количества радиации, получаемые во время астрономической весны и лета, одинаковы так же, как и количества радиации, получаемые во время осени и зимы". Из расчётов следует, что "любая широта южного полушария получает за своё летнее полугодие столько же радиации, сколько та же широта северного полушария в течение своего летнего полугодия; то же относится и к зимним полугодиям" [14, с. 33]. При исследовании вековых вариаций принимается постоянство как большой полуоси земной орбиты (в соответствии с теоремой устойчивости Лапласа), так и продолжительности времени обращения Земли вокруг Солнца (по третьему закону Кеплера) [14]. Однако следует напомнить, что законы Кеплера справедливы для невозмущённого движения. Также следует отметить, что теорема устойчивости Лапласа справедлива только при отсутствии соизмеримостей в средних движениях больших планет [53, 54, 79]. Однако в средних движениях Земли и ближайших планет: Марса, Венеры, а также Юпитера [80] — отмечаются соизмеримости (2/1, 3/5, 12/1 соответственно), или явление орбитального резонанса. В связи с этим постоянство большой полуоси земной орбиты и продолжительности периода её обращения вокруг Солнца в реальности точно не соблюдается. С периодическими изменениями величины большой полуоси земной орбиты, продолжительности периода её обращения вокруг Солнца и наклона оси вращения вследствие орбитального резонанса связаны периодические малые вариации солярного климата Земли [81–87].

Все расчёты приходящей солнечной радиации, о которых шла речь выше, объединяет одно: они проводились в диапазоне низкочастотных вариаций. Как верно отмечалось Ж. Лагранжем, П. Лапласом и М. Миланковичем, при рассмотрении солярного климата Земли в масштабах геологического времени периодические (высокочастотные) возмущения являются несущественными по сравнению с вековыми (низкочастотными) возмущениями. Для интервала времени малой продолжительности (нескольких десятков–сотен лет) высокочастотные вариации солярного климата Земли могут иметь значение среди прочих причин изменения современного глобального климата.

Таким образом, необходимость расчётов инсоляции Земли в диапазоне высокочастотных вариаций определяется несколькими причинами. Во-первых, это связано с постоянным обновлением исходных астрономических данных для расчётов инсоляции (учитывающим изменения в теории возмущений). Во-вторых, связано с тем, что отклик климатической системы Земли во временном диапазоне вековых (низкочастотных) вариаций однозначно не определён, а в диапазоне периодических (высокочастотных) вариаций исследован совершенно недостаточно.

Исследования вариаций солярного климата Земли в диапазоне высокочастотных вариаций на современном временном интервале малой продолжительности представляются перспективными и по ряду других причин. Во-первых, этот интервал времени обеспечен астрономическими данными, обладающими наибольшей в настоящее время точностью. Во-вторых, он также обеспечен подробной климатологической информацией, что позво-

ляет проводить детальные исследования связи вариаций климатических элементов и поступающей к Земле солнечной радиации. Найденные связи могут использоваться при палеогеографических реконструкциях (по принципу известного в геологии метода актуализма) или моделировании палеоклимата. Такой временной масштаб удобен и для сравнительного анализа вариаций приходящей солнечной радиации разной физической природы (связанных с небесно-механическими процессами и активностью Солнца). Он представляет возможность для определения характера отклика климатической системы Земли на вариации приходящего потока солнечной радиации разной физической природы.

### 3. Периодические (высокочастотные) вариации инсоляции

Расчёты, учитывающие периодические возмущения элементов земной орбиты и связанные с ними высокочастотные вариации солнечной радиации, были начаты в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова в России [88, 89]. Однако дальнейшего развития эти исследования не получили. Исследования высокочастотных вариаций инсоляции проводятся в Институте астрономии и геофизики им. Г. Леметра, Бельгия [90, 91]. Расчёты инсоляции (на основе решения задачи о движении двух тел) в этом диапазоне выполнялись в Институте криосферы Земли (Тюмень) И.И. Смольским и О.И. Кротовым [61].

Нами также были проведены расчёты инсоляции в диапазоне высокочастотных вариаций [92–94]. Расчёты приходящей солнечной радиации выполнялись нами по данным высокоточных астрономических эфемерид [95, 96] для всей поверхности Земли (без учёта атмосферы) в интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. Исходными астрономическими данными для расчётов инсоляции были склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего времени (среднего солнечного) и всемирного корректуремого времени (истинного солнечного). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 — Geodetic Reference System, 1980) с длинами полуосей 6378137 м (большие) и 6356752 м (малая). В общем виде алгоритм расчётов можно представить выражением

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

где  $I_{mm}$  [Дж] — приходящая солнечная радиация за элементарный  $n$ -й фрагмент  $m$ -го тропического года;  $\sigma$  [м<sup>2</sup>] — площадной множитель, с помощью которого вычисляется площадной дифференциал  $\sigma(H, \varphi) d\alpha d\varphi$  (площадь бесконечно малой трапеции) ячейки эллипсоида;  $\alpha$  [рад] — часовой угол;  $\varphi$  [рад] — географическая широта;  $H$  [м] — высота поверхности эллипсоида относительно поверхности Земли;  $A(H, \varphi, t, \alpha)$  [Вт м<sup>-2</sup>] — инсоляция в заданный момент в заданном месте эллипсоида;  $t$  [с] — время. Шаги при интегрировании составляли по долготе 1°, по широте 1°, по времени 1/360 часть продолжительности тропического года [82]. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI, Total solar irradiance) принималось равным 1361 Вт м<sup>-2</sup> [97]. Изменение активности Солнца не учитывалось. Подробно методика выполненных расчётов приходящей на эллипсоид Земли (без учёта атмосферы) солнечной энергии изложена в работах [93, 94].

Основные отличия нашего подхода [92–94] (по времени, пространству и исходным данным) от известных (из астрономической теории климата) расчётов низкочастотных вариаций инсоляции заключаются в следующем.

1. М. Миланкович и его последователи рассчитывали инсоляцию Земли (без учёта атмосферы) на длительные периоды времени (от нескольких сотен тысяч до миллионов лет) с учётом только её вековых вариаций, связанных с изменением эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси вращения Земли (с периодами в несколько десятков тысяч лет). Разрешение по времени в расчётах составляло приблизительно от 5000 лет в работах М. Миланковича [14], Ш. Шараф и Н. Будниковой [17–19], С.А. Мониной [16] до 1000 лет в работах А. Вернекара [59], А. Берже [20–22, 58]. М. Миланкович и его последователи рассчитывали суточную и годовую инсоляцию на некоторый начальный год (например, 1850 или 1950 г.) для определённой широты. Затем совершался шаг (от 1000 до 5000 лет) в прошлое (или в будущее) и процедура расчётов (с учётом изменения эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси) повторялась. Периодические вариации инсоляции не учитывались (продолжительность тропического года принималась постоянной). В проведённых нами расчётах учитывались вековые и периодические вариации (расстояния Земля–Солнце, продолжительности тропического года, наклона оси вращения и т.д.). Разрешение по времени при интегрировании в наших расчётах составляло 1/360 часть продолжительности тропического года (приблизительно сутки) с учётом вариаций этой продолжительности [82, 84, 93].

2. М. Миланковичем и всеми его последователями расчёты выполнялись только для отдельных географических параллелей (широт), принималось, что Земля имеет форму сферы. В наших расчётах инсоляция рассчитывалась для всей земной поверхности, аппроксимируемой эллипсоидом (и для отдельных широтных зон). Разрешение по пространству при интегрировании составляло по долготе  $1^\circ$ , по широте  $1^\circ$ .

3. Для выполнения расчётов М. Миланковичем (точнее, В. Мишковичем) на длительный период были вычислены астрономические эфемериды для эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси вращения Земли, которые в дальнейшем уточнялись его последователями [17–22, 57–59, 98]. И.И. Смутьский и О.И. Кротов [61] проводили расчёты на основе решения задачи двух тел (т.е. с рядом ограничений в исходных астрономических данных). Нами для расчётов инсоляции использовались приведённые в формуле (2) параметры, учитывающие вековые и периодические вариации элементов орбиты Земли и оси её вращения. В качестве исходных данных использовались высокоточные астрономические эфемериды, рассчитанные в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института (период от 3000 лет до н.э. до 3000 лет н.э.) и размещённые на электронном ресурсе НАСА [96].

Отличия нашего подхода в анализе высокочастотных вариаций инсоляции от методов Е.П. Борисенкова, М.-Ф. Лутр (Loutre), С. Бертрана (Bertrand) и их коллег связаны, во-первых, с исходными астрономическими данными, используемыми в расчётах, во-вторых, с различным решением расчётов инсоляции относительно поверхности Земли. В-третьих, они различаются временными интервалами, охваченными расчётами. В качестве исходных данных Е.П. Борисенковым с коллегами использовались эфемериды, рассчитанные в Институте теоретической астрономии Академии наук СССР (e-mail

сообщение А.В. Цветкова, 2015). Исходными данными для расчётов, выполненных бельгийскими исследователями [90, 91], были эфемериды VSOP82 [98]. В проведённых нами расчётах использовались планетарные и лунные эфемериды JPL (Jet Propulsion Laboratory) — Planetary and Lunar Ephemerides DE-405/406 [96, 99].

Поверхность Земли при расчётах инсоляции отождествлялась нашими предшественниками со сферой, и расчёты выполнялись только для отдельных параллелей (широт). Е.П. Борисенковым с коллегами [88, 89] получены значения только для параллелей  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $80^\circ$  с.ш. В исследованиях бельгийских учёных [90] расчёты выполнялись (на середину июля, точнее, для точки с геоцентрической долготой, равной  $120^\circ$ ) только для параллели  $65^\circ$  с.ш.; для точек равноденствия и солнцестояния — для экватора и параллелей  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$  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 [100].

В работе С. Бертрана с коллегами [101] расчёты инсоляции охватывают предшествующее тысячелетие, они также относятся к июлю (точке с геоцентрической долготой, равной  $120^\circ$ ) и проведены для широтной зоны  $65^\circ$ – $70^\circ$  с.ш. При этом значения для широтной зоны рассчитывались усреднением значений, полученных для параллелей  $65^\circ$  и  $70^\circ$ , ограничивающих широтную зону. В работе И.И. Смутьского и О.И. Кротова расчёты выполнялись для параллелей  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $80^\circ$  и  $90^\circ$  каждого полушария. В наших расчётах поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом, и входящая радиация рассчитывалась не для отдельных параллелей (широт), а для поверхностей отдельных широтных зон (с разрешением по широте в  $1^\circ$ ) и всей Земли.

Разрешение по времени при расчётах высокочастотных вариаций инсоляции в работе Е.П. Борисенкова с коллегами приблизительно соответствует суткам [88]. Однако выполненные ими расчёты 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 [90] расчёты проводились на интервале в 5000 лет (в прошлое) с годовым разрешением и только для июля (отдельной точки с геоцентрической долготой  $120^\circ$ ), точек равноденствия и солнцестояния. В работе С. Бертрана с коллегами [101] расчёты инсоляции охватывают предшествующее тысячелетие, но они относятся только к одному месяцу — июлю (выполнены с годовым разрешением). Кроме этого, значение солнечной постоянной в наших расчётах принималось равным  $1361 \text{ Вт м}^{-2}$  [97]. Оно равно  $1368 \text{ Вт м}^{-2}$  в работах наших предшественников [91, 101],  $1367 \text{ Вт м}^{-2}$  в работах Е.П. Борисенкова с коллегами (e-mail сообщение А.В. Цветкова, 2015) и М.-Ф. Лутр с коллегами [90],  $1366 \text{ Вт м}^{-2}$  [67]. И.И. Смутьский и О.И. Кротов использовали то же значение солнечной постоянной, что и М. Миланкович —  $1395,6 \text{ Вт м}^{-2}$  [14, 61].

Выполненные нами расчёты основаны на высокоточных эфемеридах, в них используется новое значение солнечной постоянной ( $1361 \text{ Вт м}^{-2}$ ), более детально охватывается временной интервал протяжённостью в 5999 лет и вся поверхность Земли. Земля в наших расчётах не отождествляется со сферой, а аппроксимируется эллипсоидом. Выполненные расчёты, таким образом, закрывают пространственные и временные "бреши" в расчётах инсоляции для периода от 3000 лет до н.э. до 2999 лет н.э.,

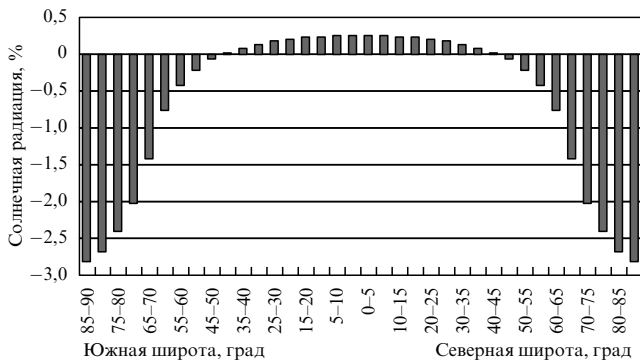


Рис. 4. Широтное изменение годовой инсоляции Земли в интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. [92].

что создаёт возможности для детального анализа инсоляции Земли, изменения её солярного климата в отмеченном интервале времени.

Анализ рассчитанной инсоляции показывает, что в современную эпоху отмечается слабая тенденция к её сокращению [92, 93]. 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 % [93]. Эта тенденция связана с низкочастотной вариацией эксцентриситета земной орбиты (с периодом около 92000 лет) [14, 16, 19, 27]. Тенденция к сокращению инсоляции для современной эпохи (в летнее полугодие на параллели 65° с.ш.) отмечается и в расчётах, графически представленных на рис. 3. Однако более существенные изменения инсоляции происходят по широтам и сезонам года (рис. 4.)

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 инсоляции, а выше 45° — к её сокращению. Следовательно, это ещё одна из тенденций изменения приходящей от Солнца энергии в современную эпоху — усиление широтной контрастности (увеличение межширотного градиента) инсоляции [84, 92]. Сходный характер распределения инсоляции по широтам для современной эпохи отмечается в работе [61]. Анализ инсоляции Земли показывает, что в зимние для полушарий полугодия приходящая на ВГА солнечная радиация увеличивается, а в летние — сокращается, т.е. отмечается сглаживание сезонных различий в инсоляции (рис. 5).

Сокращение приходящей в широтную зону 65°–70° с.ш. (на ВГА) радиации за предшествующие 1000 лет для середины июля (точки с геоцентрической широтой 120°) также отмечается в работе бельгийских исследователей [91]. Отмеченные низкочастотные изменения — тенденции (усиление широтной контрастности и сглаживание сезонных различий) в инсоляции Земли связаны с вековой тенденцией уменьшения наклона оси вращения Земли (относительно перпендикуляра к плоскости эклиптики) в результате прецессии (с периодом около 40000 лет). Ранее отмечалось, что при увеличении угла наклона оси вращения увеличивается приход солнечной радиации в полярные районы, т.е. происходит сглаживание широтной контрастности в полушариях и усиление сезонных различий. При уменьшении угла наклона имеют место увеличение радиации, поступающей в экваториальную область, и уменьшение радиации, поступающей в полярные районы, возрастают широтные контра-

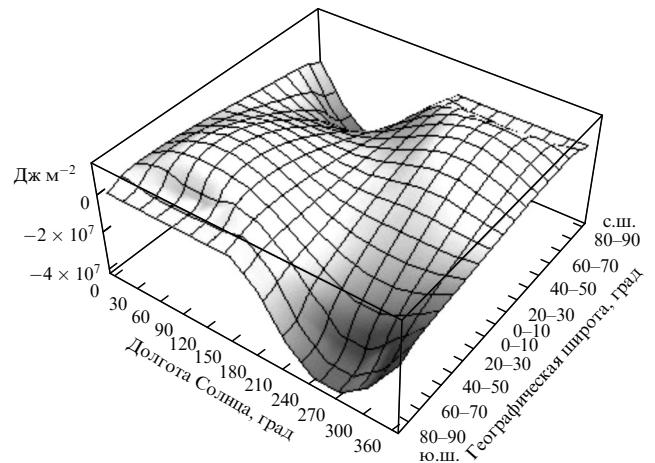


Рис. 5. Пространственно-временная изменчивость инсоляции Земли (без учёта атмосферы) на интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. [92].

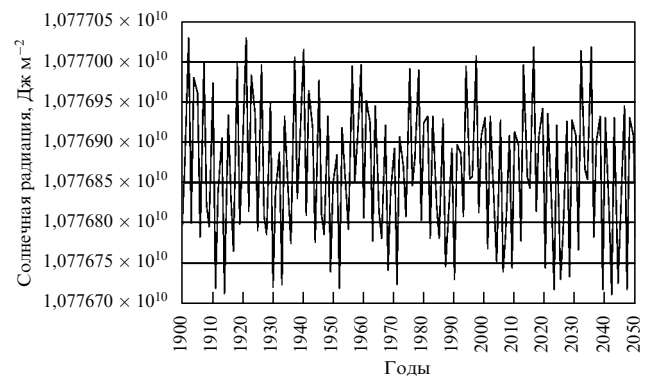


Рис. 6. Многолетняя изменчивость инсоляции Земли в интервале с 1900 по 2050 гг. [93].

сты, а сезонные различия сглаживаются [4, 14, 16, 39]. По нашим расчётам уменьшение угла наклона оси вращения Земли за период с 3000 г. до н.э. по 3000 г. н.э. составляет около 0,7° [93].

На фоне отмеченных тенденций, в основном определяемых низкочастотными колебаниями эксцентриситета и угла наклона оси вращения Земли, в приходящей на ВГА радиации проявляются высокочастотные вариации (рис. 6), причиной которых являются периодические возмущения элементов земной орбиты Луной и планетами Солнечной системы. Отметим, что высокочастотные вариации инсоляции Земли рассматриваются нами в работе в значениях, кратных периоду обращения Земли вокруг Солнца, т.е. кратных одному году [82, 92, 93]. Именно с этим годовым периодом связано главное колебание в климатической системе Земли.

Эти высокочастотные вариации, как уже отмечалось, не учитывались в расчётах, основанных на вековых изменениях эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси вращения Земли [14, 16, 17, 20, 21, 39, 59].

В работе Е.П. Борисенкова с коллегами [88] с помощью спектрального анализа в рассчитанных на 300 лет (1800–2100 гг.) рядах приходящей на ВГА Земли солнечной радиации выделяются вариации с периодами 2,7, 4,0, 5,9 и 11,9 лет. Первые три гармоники, по мнению авторов, связаны с возмущениями Венеры и Меркурия. Вариация с периодом 11,9 лет соотносится с возмущающим



движением Юпитера. Также выделяется гармоника с периодом 18,6 лет, связываемая с периодом обращения лунных узлов [88]. В рассчитанных И.И. Смутьским и О.И. Кротовым на 200000 лет в прошлое рядах значений приходящей радиации отмечаются вариации с периодами 2,75, 3,98, 11,86 и 18,6 лет. (гармоника 18,6 лет является результатом возмущающего действия Луны на ось вращения Земли) [61]. В работе М-Ф. Лутр с коллегами из Института астрономии и геофизики им. Г. Леметра также на основе спектрального анализа рассчитанных для 6000 лет в прошлое значений инсоляции выделяется большой набор вариаций с периодами 2,67, 3,98, 5,92, 8,1, 11,9, 15,7, 18,6 лет [90]. Гармоники с периодами 2,67, 3,98, и 8,1 лет связываются авторами с движением Венеры, гармоники с периодами 5,93 и 11,9 лет — с движением Юпитера. Гармоника с периодом 15,7 лет соотносится с движением Марса. Вариация с периодом 18,6 лет сопоставляется с периодом обращения лунных узлов. В работе Бертрана с коллегами отмечается, что найденные авторами периодичности в инсоляции (за 1000 предшествующих лет) 2,7 и 4,0 года могут быть связаны с соотношениями в движениях Венеры и Земли, а гармоники с периодами 5,9 и 11,9 лет — с движением Юпитера. Выделяемая вариация с периодом 18,61 лет соотносится с движением лунных узлов [91].

В недавно выполненных исследователями из Национального технологического университета Аргентины и Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики (США) расчётах инсоляции на период от 12000 тысяч лет в прошлое до 1000 лет в будущее с использованием новых астрономических эфемерид (DE-431) спектральным анализом также выделяется характерный набор высокочастотных гармоник [102]. Вариации с периодами 2,69, 3,98, 7,88 и 8,1 лет связываются авторами с вариациями в движениях Земли и Венеры. Возмущениям в средних движениях Марса и Земли авторы соотносят гармоники 2,42, 2,9, 3,56, 5,26 и 15,76 лет. С движением Юпитера связываются гармоники 11,86 и 6,0 лет. Отмечается периодичность 18,6 лет, соответствующая нутационному циклу. Наибольшая спектральная плотность отмечается в диапазоне с периодами от 2 до 3 лет и около 20 лет. Спектральным анализом также выделяются гармоники с более продолжительными периодами, которые соотносятся авторами с периодичностью в движениях дальних планет (Сатурн, Уран, Нептун) [102]. Эти расчёты инсоляции были выполнены для отдельных широт земной сферы с учетом суточного изменения долготы Солнца, но без учёта изменения продолжительности тропического года.

На наш взгляд, реальные периодические соотношения движений планет относительно Земли могут выражаться только целочисленными значениями (кратными одному году), поскольку основное движение Земли имеет период, равный одному году. В таких же соотношениях находятся и высокочастотные периодичности в инсоляции Земли.

Из отмеченных выше периодичностей во всех представленных в обзоре высокочастотных расчётах инсоляции общими являются вариации с периодами около 2,7, 4,0, 11,9 и 18,6 лет. Сразу отметим, что в работах [90, 102] также выделяется периодичность около 8 лет. В полученных нами рядах также проявляется периодичность. При этом она не является скрытой периодичностью, а следовательно, не нуждается в проведении спектрального анализа [81, 82, 92].

В изменчивости солнечной постоянной, продолжительности тропического года и рассчитанной нами ин-

соляции отчётливо выделяются 2- и 3-летние циклы, которые образуют чередующиеся серии продолжительностью 8 (2 + 3 + 3) и 11 (2 + 3 + 3 + 3) лет [81, 82, 84, 92]. При этом основной максимум спектральной плотности приходится на период 2,7 года. С учётом того, что исследуемый период включает приблизительно 70 % полных 3-летних и 30 % 2-летних циклов, период 2,7 года в спектральном анализе определяется именно соотношением 2- и 3-летних циклов в рядах инсоляции [82, 84].

Известно, что в параметрах движений планет и их спутников выдерживается ряд интересных соотношений вследствие наличия соизмеримостей и резонансов [79, 80, 103]. Условия резонанса определяются равенством частот вынужденных (под действием внешней силы) и собственных колебаний. Рассмотрим это подробнее. Сидерическим, или звёздным, периодом обращения планеты называется промежуток времени, в течение которого планета совершает один полный оборот вокруг Солнца по своей орбите. Сидерический период Венеры составляет 224,701 сут (0,61521 тропического года), Марса — 686,980 сут (1,88089 тропического года), Земли (звёздный год) — 365,256 сут (1,00004 тропического года). Частоты обращения планет ( $\omega = 2\pi/T$ ) составляют для Венеры  $0,0279624 \text{ сут}^{-1}$ , для Марса —  $0,0091460 \text{ сут}^{-1}$ , для Земли —  $0,0171894 \text{ сут}^{-1}$ . Отсюда следует  $2\omega_{\text{Mars}} (0,0182920 \text{ сут}^{-1}) - \omega_{\text{Earth}} (0,0171894 \text{ сут}^{-1}) = 0,0011026 \text{ сут}^{-1}$  и  $3\omega_{\text{Venus}} (0,0838872 \text{ сут}^{-1}) - 5\omega_{\text{Earth}} (0,085947 \text{ сут}^{-1}) = -0,0020598$ . Это свидетельствует о том, что в орбитальных движениях Земли с ближайшими планетами Марсом и Венерой существует соизмеримость (форма связи орбитальных объектов). При этом резонанс Земли с Марсом равен 2/1, Земли с Венерой — 5/3 [80, 103].

Таким образом, через каждые 2 года взаимные положения Земли и Марса и через 3 года Земли и Венеры относительно Солнца повторяются. С этими повторениями связаны периодические резонансные возмущения орбитального движения Земли и, следовательно, вариации солнечной постоянной, продолжительности тропического года и инсоляции на ВГА Земли. В соотношении 2- и 3-летних циклов в рядах продолжительности тропического года и инсоляции, вероятно, отражается и соотношение возмущающего действия этих планет. Около 70 % циклов исследуемого временного ряда образованы 3-летними циклами, которые определяются возмущениями орбитального движения Земли со стороны Венеры (3-летняя периодичность). Остальная часть временного ряда, около 30 %, представлена 2-летними циклами, которые определяются более слабым возмущением орбитального движения Земли Марсом [82, 84, 93].

Чередующиеся 11-летние и 8-летние циклы (образованные сочетаниями 2- и 3-летних циклов) в сумме составляют 19-летний цикл, влияющий на траекторию, скорость орбитального движения Земли (второй по значимости пик в спектре). Следовательно, причины найденной периодичности (2, 3, 8, 11 и 19 лет) могут объясняться резонансными возмущениями инсоляции, связанными с соизмеримостью в орбитальных движениях Земли с Венерой и Марсом, а также явлением нутации, связанным с периодом обращения лунных узлов и, вероятно, циклом Метона [84, 104]. Таким образом, в высокочастотных вариациях инсоляции Земли отмечается синхронизация 2- и 3-летней периодичности с 8- и 11-летними фазами 19-летнего цикла. Так, 2- и 3-летние циклы образуют 8-летние (2 + 3 + 3) и 11-летние (2 + 3 + 3 + 3) серии, соответствующие фазам 19-летнего цикла. Спектральный анализ несколько искажает

реальную картину из-за смещения реальных и появления, вероятно, ложных гармоник 4,0, 6,0 и др. [90]. Таким образом, малые вариации в поступлении и распределении инсоляции на ВГА Земли определяются орбитальными резонансами Земли с ближайшими планетами Венерой и Марсом и спутником Земли Луной. Сопоставления найденных разными исследователями высокочастотных вариаций инсоляции с периодичностью в движении дальних планет [90, 103] не представляются обоснованными. Однако причиной отмечаемых нами редких нарушений правильного чередования 8- и 11-летних циклов может быть возмущающее действие Юпитера, среднее движение которого находится в слабом резонансе со средним движением Земли (1/12).

При определении пространственной структуры 19-летней вариации для упрощения нами анализировались разности поступающей от Солнца энергии в десятый и первый год десятилетий для соответствующих широтных зон. В действительности, как отмечалось, фазы 19-летнего цикла характеризуются продолжительностью 8 и 11 лет [81–84, 93]. Анализ показывает закономерные изменения в пространственной структуре инсоляции Земли в различных фазах 19-летнего цикла. Для одной фазы цикла характерно сокращение поступающей лучистой энергии в полярные районы и увеличение её в экваториальной области. В другую половину цикла отмечается обратная картина — сокращение приходящей энергии в экваториальной области и увеличение её в полярных районах (рис. 7). Отмеченный характер распределения связан с нутацией. Лунная орбита медленно вращается и за 18,61 года совершает полный оборот, возвращаясь в исходное положение (т.е. Луна будет пересекать эклиптику в той же точке через 18,61 года). С этим периодом и связано явление нутации (изменение наклона оси вращения Земли из-за возникающего в возмущающем действии Луны неравенства), поэтому его называют нутационным циклом или периодом [79, 100, 103].

При этом одна фаза 19-летнего нутационного цикла усиливает отмеченную для вековой изменчивости тенденцию увеличения широтной контрастности в инсоляции, другая фаза ослабляет её. Максимальные амплитуды высокочастотных вариаций отмечаются в 19-, 11- и 8-летних циклах. Они характерны для полярных областей зимних полушарий и во всех этих циклах составляют 0,0678 %. Амплитуда 2- и 3-летних вариаций в этих широтах в зимние сезоны характеризуется значением 0,0538 % [83, 84, 92, 93]. Это определяется как большими

вариациями наклона оси из-за нутации в полярных областях, так и малыми значениями зимней инсоляции. Такие вариации в полярных районах имеют тот же порядок, что и вариации TSI в 11-летнем цикле (около 0,07 %) [105]. Локализация максимальных значений амплитуды вариаций инсоляции с периодом 18,6 лет в полярных районах отмечается и в работах [61, 89].

Интересно соотношение между синодическим месяцем и средним солнечным годом, найденное в 433 г. до н.э. афинским астрономом Метонем: 235 синодических месяцев почти точно составляет 19 солнечных лет. Таким образом, в вариациях инсоляции могут проявляться две связанные с Луной гармоник. Одна определяется периодичностью возмущающего действия на ось вращения Земли (нутация) и связана с движением лунной орбиты (лунных узлов). Другая гармоника определяется неравенством в изменении расстояния между Землёй и Солнцем из-за возмущающего действия Луны на орбитальное движение Земли (синодическая вариация) [100].

Таким образом, расчётами определены малые и регулярные высокочастотные вариации инсоляции, связанные с периодическими возмущениями орбитального движения Земли и наклона оси её вращения [61, 88, 90, 91, 92, 102]. Отмеченные вариации могут усиливаться резонансным откликом климатической системы Земли на кратные году (собственному периоду климатической системы) возмущения её орбитального движения. Кроме того, возможен эффект стохастического резонанса — отклика бистабильной или метастабильной нелинейной системы на слабый периодический сигнал при шумовом воздействии определённой мощности [106]. Отмеченные колебания инсоляции можно считать слабыми периодическими сигналами для климатической системы Земли при шумовом воздействии.

Как показали проведённые нами исследования, климатическая система Земли (глобальный климат) сильнее откликается на вариации в распределении приходящей солнечной радиации по широтам (связанные с изменением угла наклона оси) и сезонам, чем на вариации в её поступлении [60, 86, 93, 107, 108]. Эти вариации в распределении солнечной радиации по широтам и сезонам существенно больше вариаций в приходящей к Земле солнечной радиации.

По результатам выполненных нами расчётов сформирована общедоступная база данных приходящей солнечной энергии во все широтные зоны Земли (протяжённостью  $5^\circ$ ) за каждый астрономический месяц каждого года для периода от 3000 лет до н.э. до 2999 лет н.э. [109]. Значения инсоляции Земли представлены в массивах данных (в трёх единицах измерения — Дж, Дж  $m^{-2}$  и Вт  $m^{-2}$ ). Размерность соответствует общей лучистой энергии, удельной энергии и её интенсивности. Эта база отражает вариации солнечной радиации, физическая природа которых определяется небесно-механическими процессами. Расчётные данные могут использоваться как входной энергетический сигнал в радиационном блоке физико-математических моделей климата (Incoming Solar Radiation). Рассчитанные нами данные по инсоляции могут использоваться и при точных расчётах радиационного баланса Земли, поскольку ВГА является условной поверхностью отсчёта приходящей к Земле лучистой энергии (рис. 8) [110–115]. Учёт пространственно-временных вариаций приходящей на ВГА солнечной радиации (т.е. изменения начальных условий) при расчётах радиационного и теплового баланса Земли, её поверхности и атмосферы способствует как повышению точности

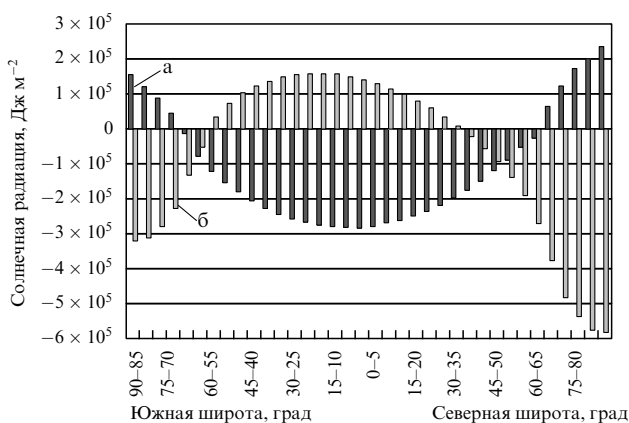


Рис. 7. Широтная изменчивость инсоляции Земли в 19-летнем цикле (а) в фазу 2000–2009 гг., (б) в фазу 2010–2019 гг. [84].

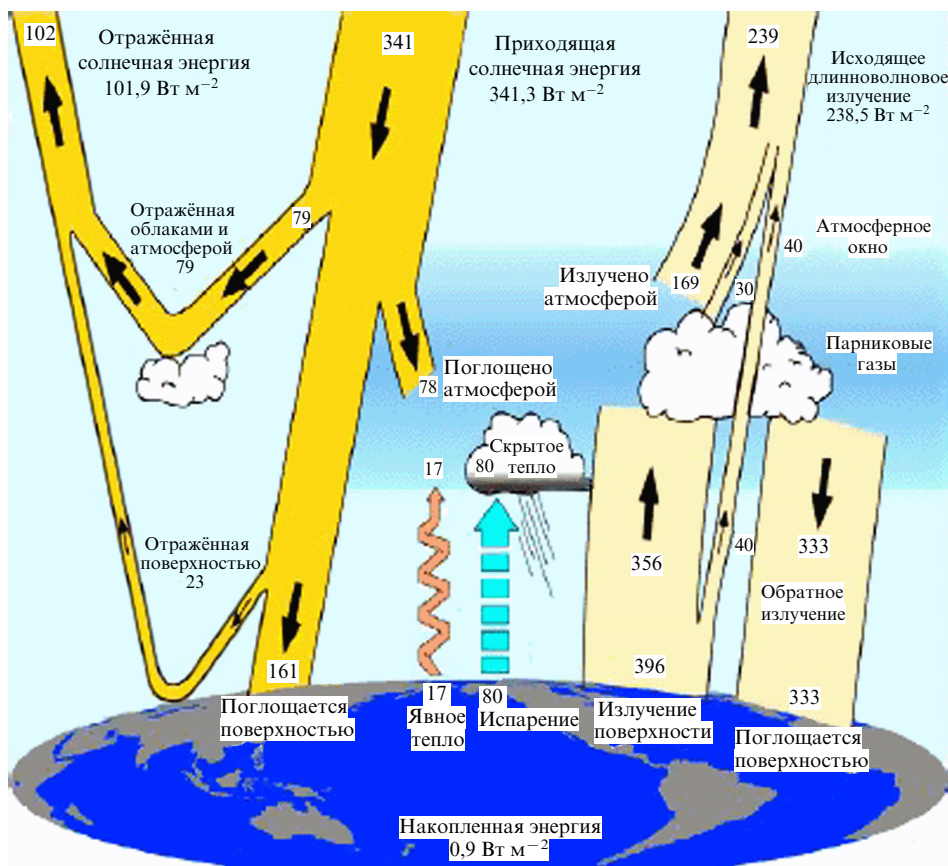


Рис. 8. Составляющие радиационного баланса Земли [113].

расчётов, так и увеличению глубины прогнозов. Это определяется тем, что малые различия в начальных условиях (в случаях нелинейных зависимостей) могут приводить к возрастающему со временем расхождению результатов расчётов.

Значение  $341 \text{ Вт м}^{-2}$  на входе (на внешней границе атмосферы или на поверхности Земли без учёта атмосферы) получается делением значения солнечной постоянной (для рис. 4 —  $1364 \text{ Вт м}^{-2}$ ) на 4, так как 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 её большого круга. В наших базах данных входной радиационный сигнал рассчитан не относительно площади сферы, а относительно площади эллипсоида [84, 92, 93, 116].

Следует отметить, что при расчётах вариаций инсоляции, связанных с небесно-механическими процессами, вычисления проводятся от принятого и неизменного значения солнечной постоянной (среднего многолетнего значения TSI) и не нормируются по расстоянию. При изучении вариаций TSI отсчёт ведётся относительно неизменного расстояния между Солнцем и Землёй, равного 1 а.е. (среднее за год).

В связи с тем, что солнечная радиация является основным источником тепла в климатической системе Земли, её значения используются при моделировании климата. Однако при отмеченных успехах в измерениях и расчётах приходящей солнечной радиации нерешёнными остаются некоторые весьма существенные проблемы, которые следуют из приведённого выше обзора вариаций приходящей радиации.

#### 4. Общие проблемы учёта вариаций приходящей солнечной радиации в физико-математических моделях климата

##### 4.1. Входной энергетический сигнал

В настоящее время в качестве входящего в климатическую систему Земли внешнего энергетического сигнала в радиационном блоке физико-математических моделей климата (CLIM-5) IPCC рекомендовано использование данных, полученных [117] в результате радиометрических измерений общего потока радиации (с 1978 г.) и реконструкции TSI (с 1610 г. с годовым и с 1882 г. с месячным разрешением) [118]. Реконструкция общего потока радиации (TSI) выполнена на основе вариаций солнечной активности (чисел пятен и факельных вспышек). Эти реконструированные данные не отражают изменений инсоляционной контрастности, с которыми связано усиление межширотного теплообмена (работы "тепловой машины первого рода") [6], а также многолетняя изменчивость приповерхностной температуры воздуха (ПТВ), температура поверхности океана (ТПО), уровень Мирового океана (УМО) и площадь распространения морских льдов [85, 86, 93]. Инсоляционная контрастность — это разность между годовой радиацией, приходящей в области  $0^\circ\text{--}45^\circ$  (источник тепла) и  $45^\circ\text{--}90^\circ$  (сток тепла) в каждом полушарии (для Земли рассчитывается среднее по полушариям). Инсоляционная контрастность отражает характер меридионального переноса энергии на ВГА.

Учёт отмеченного измеренного и реконструированного TSI в качестве входного энергетического сигнала

[118] неверен при климатическом моделировании по следующим причинам. Во-первых, он отражает изменение общего прихода радиации к Земле. Такое изменение, как показывают выполненные расчёты инсоляции Земли, для современной эпохи незначительно (около 0,005 % за 6000 лет) [92, 93]. Эти вариации в приходе солнечной радиации рассчитываются и для отдельных широтных зон по косинусу широты (без учёта изменения угла наклона оси вращения Земли). Однако, поскольку вариации приходящей к Земле радиации малы, вариации в широтных зонах в этом случае также оказываются малыми. Важен учёт не вариаций в поступлении радиации, а вариации в её распределении по широтным зонам в связи с изменением наклона оси вращения Земли (эти вариации в годовом распределении за 6000 лет составляют около 3 %) (см. рис. 4).

Именно этими вариациями определяются тренды в изменении глобальных ПТВ Земли (и её отдельных широтных зон) [85, 86, 93]. Во-первых, применяемый в современных моделях климата учёт вариаций приходящей к Земле радиации этого не учитывает (как не учитывает и изменения в переносе энергии на ВГА, а следовательно, и в системе океан–атмосфера). Во-вторых, в моделях не учитывается изменение соотношений вариаций различной физической природы в приходящей радиации (TSI) в зависимости от временного разрешения и их различное влияние на формирование и изменение климата. Вариации, связанные с небесно-механическими процессами, обозначаются нами как  $TSI_{СМР}$  (celestial mechanical process). Вариации TSI, связанные с изменением активности Солнца (solar activity), обозначаются как  $TSI_{СА}$ .

#### 4.2. Соотношение вариаций разной физической природы в изменчивости TSI

Из рассчитанных данных приходящей радиации [93] следует, что соотношение вариаций разной физической природы даже в слабо изменяющемся приходе радиации меняется в зависимости от временного разрешения. Например, межгодовая изменчивость инсоляции в диапазоне месячного разрешения (рис. 9) на 55 % определяется вариациями, связанными с небесно-механическими процессами ( $TSI_{СМР}$ ), и на 45 % — вариациями солнечной активности ( $TSI_{СА}$ ).

Разность значений составляющих межгодовой изменчивости TSI, связанной с небесно-механическими процессами ( $TSI_{СМР}$ ) и определяемой изменением активно-

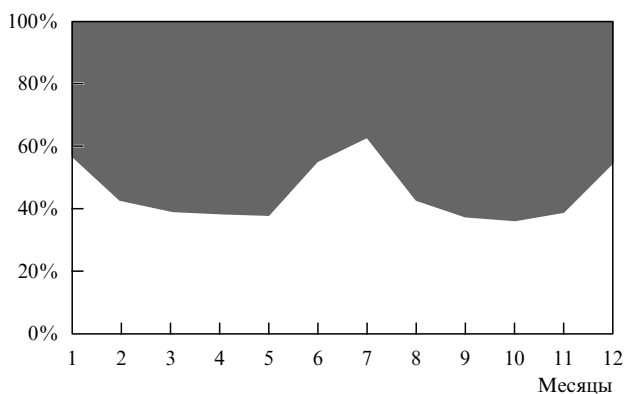


Рис. 9. Соотношение вариаций  $TSI_{СА}$  и  $TSI_{СМР}$  (показаны тёмным фоном) в межгодовой изменчивости TSI (в %) в интервале с 1882 по 2008 гг. с месячным разрешением [93].

сти Солнца ( $TSI_{СА}$ ), имеет определённый характер годового хода. Межгодовые вариации, связанные с активностью Солнца ( $TSI_{СА}$ ), превышают веса межгодовых вариаций, определяемых небесно-механическими процессами ( $TSI_{СМР}$ ), на протяжении 4 месяцев (1/3 года): июня, июля, декабря, января. Временные интервалы доминирования вариации  $TSI_{СА}$  хронологически локализованы в окрестностях точек летнего и зимнего солнцестояния. На протяжении остальных 8 месяцев (2/3 года) в межгодовой изменчивости TSI преобладает вариация, определяемая небесно-механическими процессами ( $TSI_{СМР}$ ). Максимальные значения преобладающих вариаций ( $TSI_{СМР}$ ) приходятся на интервалы вблизи точек равенства. Для периода спутниковых радиометрических наблюдений с 1978 по 2008 гг. среднее соотношение характеризуется весовыми значениями 45,71 % ( $TSI_{СА}$ ) и 54,29 % ( $TSI_{СМР}$ ) [93].

Предлагаемые IPCC-значения реконструированного TSI не учитывают этого. В связи с полученными результатами рекомендуется в качестве входящего энергетического сигнала при моделировании климата учитывать инсоляцию и/или инсоляционную контрастность, связь многолетней изменчивости аномалии ПТВ и ТПО с которой проанализирована и оценена в работах [85, 86, 93, 94, 107, 108].

#### 4.3. Изменение переноса энергии на ВГА

Основными блоками в физико-математических моделях климата являются модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) и модели общей циркуляции океана (МОЦО). Эти блоки описываются системой уравнений гидротермодинамики, отражающей основные физические законы (законы сохранения вещества и энергии, закон сохранения количества движения). Однако эти уравнения описывают усреднённые, статические атмосферу и океан [7, 119] и не учитывают, например, изменения в переносе лучистой энергии на ВГА (и в системе океан–атмосфера). Выполненные расчёты инсоляции [93] показывают, что из-за эллипсоидальной формы Земли экваториальная область получает больше лучистой энергии, чем полярные районы. В связи с неравномерностью распределения приходящей радиации на ВГА возникает межширотный градиент инсоляции, которым определяется перенос энергии на ВГА. Отмечается постепенное увеличение переноса лучистой энергии от экватора к полярным кругам в каждом полушарии (рис. 10).

Физический процесс переноса энергии — излучение. Максимумы меридионального переноса лучистой энер-

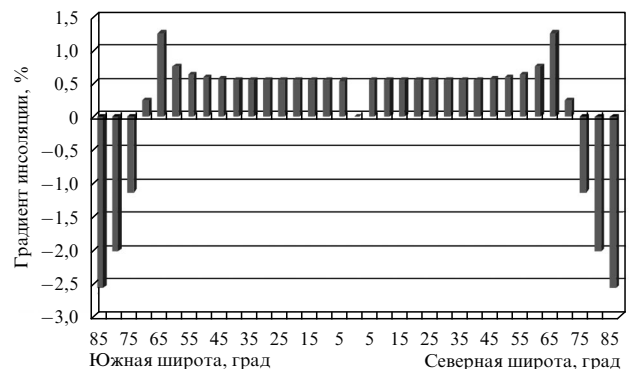


Рис. 10. Изменение меридионального годового переноса лучистой энергии на ВГА за 5998 лет (в %) [93].

гии локализованы приблизительно в районе 65 параллели в каждом полушарии (вблизи полярных кругов). В заполярных областях отмечается постепенное уменьшение (от полярных кругов к полюсам) переноса лучистой энергии. Таким образом, в каждом полушарии выделяются области увеличения (от экватора до полярного круга) и области уменьшения (от полярного круга до полюса) переноса лучистой энергии. Максимальное увеличение (на  $2,61 \times 10^{15}$  Вт или 1,25 %) отмечается в районе полярных кругов (65° широты) в каждом полушарии ("зоны турбулентности"). Максимальное уменьшение переноса (на  $3,3 \times 10^{15}$  Вт или 2,56 %) приходится на полярные районы (85° широты).

Усреднённый перенос энергии в системе океан – атмосфера [7, 119] линейно связан с усреднённым переносом энергии на ВГА [93]. Коэффициент корреляции составляет 0,98. Поскольку средний годовой перенос энергии в системе океан – атмосфера определяется средним годовым переносом энергии на ВГА, полученные для этого переноса изменения в современную эпоху (от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э.) могут проявляться в системе океан – атмосфера. Перенос энергии определяет межширотный теплообмен (работу тепловой машины первого рода), который в настоящее время усиливается из-за уменьшения угла наклона оси вращения Земли [85–87, 93]. Полученные изменения в меридиональном переносе энергии на ВГА также следует учитывать в системе уравнений гидротермодинамики (уравнения законов сохранения массы, импульса, энергии и состояния газа) для атмосферы [120, 121], используемой при численных экспериментах в физико-математических моделях климата. Используемые в моделях общей циркуляции атмосферы (МОЦА) и океана (МОЦО) уравнения гидротермодинамики описывают статические атмосферу и океан, которые таковыми в реальности не являются.

Решение этих общих проблем, возможное в связи с полученными расчётами инсоляции Земли, может способствовать совершенствованию физико-математических моделей климата и прогноза его изменений.

## Список литературы

1. The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, <http://www.ipcc.ch/>
2. Кондратьев К Я *Глобальный климат и его изменения* (Л.: Наука, 1987)
3. Кондратьев К Я *Глобальный климат* (СПб.: Наука, 1992)
4. Монин А С, Шишков Ю А *УФН* **170** 419 (2000); Monin A S, Shishkov Yu A *Phys. Usp.* **43** 381 (2000)
5. Зубов Н Н *Морские воды и льды* (М.: Гидрометеоздат, 1938)
6. Шулейкин В В *Физика моря* (М.: Изд-во АН СССР, 1953)
7. Lorenz E N *The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere* (Geneva: World Meteorological Organization, 1967); Пер. на русск. яз.: Лоренц Э Н *Природа и теория общей циркуляции атмосферы* (Л.: Гидрометеоздат, 1970)
8. Бudyko M И *Изв. АН СССР. Сер. географическая* **5** 36 (1968)
9. Бudyko M И *Климат в прошлом и будущем* (Л.: Гидрометеоздат, 1980); Пер. на англ. яз.: Budyko M I *The Earth's Climate, Past and Future* (New York: Academic Press, 1982)
10. Кондратьев К Я *Радиационные факторы современных изменений глобального климата* (Л.: Гидрометеоздат, 1980); Пер. на англ. яз.: Kondrat'ev K Ya *Changes in Global Climate, a Study of the Effect of Radiation and other Factors During the Present Century* (Rotterdam: A.A. Balkema, 1985)
11. Дроздов О А и др. *Климатология* (Л.: Гидрометеоздат, 1989)
12. Хромов С П, Петросьянц М А *Метеорология и климатология* (М.: Изд-во МГУ, 2006)
13. Абдусаматов Х И *Солнце диктует климат Земли* (СПб.: Логос, 2009)
14. Milankovitch M *Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen* (Handbuch der Klimatologie, Bd. 1, Teil A) (Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1930); Пер. на русск. яз.: Миланкович М *Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата* (М.-Л.: ГОНТИ, 1939)
15. Вулис И Л, Монин А С *Изв. АН СССР Сер. Физика атмосферы и океана* **15** (1) 3 (1979)
16. Монин А С *Введение в теорию климата* (Л.: Гидрометеоздат, 1982); Пер. на англ. яз.: Monin A S *An Introduction to the Theory of Climate* (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1986)
17. Шараф Ш Г, Будникова Н А *Бюлл. Института теоретической астрономии АН СССР* (11) 231 (1967)
18. Шараф Ш Г, Будникова Н А *ДАН СССР* **182** 291 (1968); Sharaf Sh G, Budnikova N A *Sov. Phys. Dokl.* **13** 835 (1969)
19. Шараф Ш Г, Будникова Н А *Тр. Института теоретической астрономии АН СССР* **14** 48 (1969)
20. Berger A L *Quaternary Res.* **9** 139 (1978)
21. Berger A L *J. Atmos. Sci.* **35** 2362 (1978)
22. Berger A L *Climatic Variations and Variability* (Dordrecht: D. Reidel, 1981)
23. Хргиан А Х *Физика атмосферы* (М.: Изд-во МГУ, 1986)
24. Монин А С, Шишков Ю А *История климата* (Л.: Гидрометеоздат, 1979)
25. Imbrie J *Icarus* **50** 408 (1982)
26. Imbrie J et al. *Paleoceanology* **8** 699 (1993)
27. Мельников В П, Смутьский И И *Криосфера Земли* (8) 3 (2004)
28. Мельников В П, Смутьский И И *Астрономическая теория ледниковых периодов: Новые приближения. Решенные и нерешенные проблемы* (Новосибирск: ГЕО, 2009)
29. Смутьский И И *Вестн. РАН* **83** 40 (2013)
30. Котляков В М, Сонечкин Д М *Лёд и снег* **55** (2) 103 (2015)
31. Adhémar J *Révolutions de la Mer: Déluges Périodiques* (Paris: Carilian-Goeury et V. Dalmont, 1842)
32. Гумбольдт А *Космос (опыт физического мирописания)* (М.: Братья Салаевы, 1866)
33. Imbrie J, Imbrie K P *Ice Ages. Solving the Myster* (Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Press, 198); Пер. на русск. яз.: Имбри Д, Имбри К П *Тайны ледниковых эпох* (М.: Прогресс, 1988)
34. Большаков В А *Новая концепция орбитальной теории климата* (М.: Московский университет, 2003)
35. Большаков В А, Капица А П *Вестн. РАН* **81** 603 (2011)
36. Scroll J *Climate and Time in their Geological Relations: a Theory of Secular Changes of the Earth's Climate* (London: Edward Stanford, 1875)
37. Schwarzbach M *Das Klima der Vorzeit; eine Einführung in die Paläoklimatologie* (Stuttgart: F. Enke, 1950); Пер. на русск. яз.: Шварцбах М *Климаты прошлого* (М.: ИЛ, 1955)
38. Leverrier U J J *Recherches Astronomiques* (Paris: Annales de l'Observatoire imperial de Paris, 1855, 1856)
39. Milankovitch M *Theorie Mathematique des Phenomenes Thermiques Produits par la Radiation Solaire* (Paris: Gauthier-Villars et Cie, 1920)
40. Марков К К *Палеогеография* (М.: Изд-во МГУ, 1960)
41. Meech L W *On the Relative Intensity of the Heat and Light of the Sun Upon Different Latitudes of the Earth* (Washington: Smithsonian Institute, 1856)
42. Ball R *The Cause of an Ice Age* (New York: D. Appleton and Co., 1891)
43. Culverwell E P *Nature* **51** 33 (1894)
44. Culverwell E P *Nature* **52** 53 (1895)
45. Hargreaves R *Trans. Cambridge Philos. Soc.* **16** 58 (1896)
46. Ekholm N *Quart. J. R. Meteorolog. Soc.* **27** 1 (1901)
47. Berger A L *Nature* **269** 44 (1977)
48. Pilgrim L *Naturkunde Wurttemberg* **60** 1 (1904)
49. Stockwell J N *Memoir on the Secular Variations of the Elements of the Orbits of the Eight Principal Planets, Mercury, Venus, The Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune: with Tables of the Same: Together with the Obliquity of the Ecliptic, and the Precession of the Equinoxes in Both Longitude and Right Ascension* (Washington: Smithsonian Institute, 1872)
50. Newcomb S *The Elements of the Four Inner Planets and the Fundamental Constants of Astronomy* (Washington: Gov't. print. off., 1895)
51. Lagrange J-L *Theorie des Variations Seculaires des Elements des Planets* (Berlin: Decker, 1781)
52. Laplace P S *Traite de Mecanique Celeste* (Paris: Bachelier Libraire, 1825)
53. Арнольд В И *УМН* **18** 91 (1963); Arnol'd V I *Russ. Math. Surv.* **18** 85 (1963)
54. Дубошин Г Н *Небесная механика. Основные задачи и методы* (М.: Наука, 1975)

55. Laplace P S *Exposition du Système du Monde* (Paris: Bachelier, 1824); Пер. на русск. яз.: Лаплас П С *Изложение системы мира* (Л.: Наука, 1982)
56. Köppen W, Wegener A *Die Klimate der Geologischen Vorzeit* (Berlin: Gebr. Borntraeger, 1924)
57. Brouwer D, Van Woerkom A J J *Astron. Papers* **13** 81 (1950)
58. Berger A, Loutre M F *Quatern. Sci. Rev.* **10** 297 (1991)
59. Vernekar A *Long-Period Global Variations of Incoming Solar Radiation* (New York: American Meteorological Society, 1972)
60. Федоров В М *Криосфера Земли* (3) 106 (1999)
61. Smulsky J, Krotov O *Appl. Phys. Res.* **6** (4) 56 (2014)
62. Berger A, Loutre M F *Earth Planet. Sci. Lett.* **111** 369 (1992)
63. Quinn T R, Scott T, Duncan M *Astron. J.* **101** 2287 (1991)
64. Laskar J *Astron. Astrophys.* **198** 341 (1988)
65. Laskar J, Joutel F, Boudin F *Astron. Astrophys.* **287** 522 (1993)
66. Laskar J et al. *Icarus* **170** 343 (2004)
67. Berger A, Loutre M-F, Yin Q *Quatern. Sci. Rev.* **29** 1968 (2010)
68. Kukla G J *Nature* **253** 600 (1975)
69. Колосов Д М *Проблемы древнего оледенения Северо-Востока СССР* (М.–Л.: Главсевморпуть, 1947)
70. Федоров В М *Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере* (М.: Физматлит, 2011)
71. Wegener A *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* (Braunschweig: F. Vieweg, 1922); Пер. на англ. яз.: *The Origin of Continents and Oceans* (New York: Dover Publ., 1966); Пер. на русск. яз.: Вегенер А *Происхождение материков и океанов* (М.–Л.: Гос. изд-во, 1925)
72. Личков Б Л *Движение материков и климаты прошлого* (Л.: Изд-во АН СССР, 1935)
73. Takeuchi H, Uyeda S, Kanamori H *Debate about the Earth; Approach to Geophysics Through Analysis of Continental Drift* (San Francisco: Freeman, 1967); Пер. на русск. яз.: Такеучи Х, Уэда С, Канамори Х *Движутся ли материк?* (М.: Мир, 1970)
74. Le Pichon X, Francheteau J, Bonnin J *Plate Tectonics* (Amsterdam: Elsevier, 1973); Пер. на русск. яз.: Ле Пишон К, Франшто Ж, Боннин Ж *Тектоника плит* (М.: Мир, 1977)
75. Сиинич В М *Введение в палеоклиматологию* (Л.: Недра, 1980)
76. Uyeda S *The New View of the Earth. Moving Continents and Moving Oceans* (San Francisco: W.H. Freeman, 1978); Пер. на русск. яз.: Уэда С *Новый взгляд на Землю* (М.: Мир, 1980)
77. Ушаков С А, Ясамапов Н А *Дрейф материков и климаты Земли* (М.: Мысль, 1984)
78. Сидоренков Н С *Физика неустойчивостей вращения Земли* (М.: Физматлит, 2002)
79. Дубошин Г Н *Небесная механика. Аналитические и качественные методы* (М.: Наука, 1978)
80. Гребеников Е А, Рябов Ю А *Резонансы и малые знаменатели в небесной механике* (М.: Наука, 1978)
81. Федоров В М *Астрон. вестн.* **46** 184 (2012); Fedorov V M *Sol. Syst. Res.* **46** 170 (2012)
82. Федоров В М *Докл. РАН* **451** 95 (2013); Fedorov V M *Dokl. Earth Sci.* **451** 750 (2013)
83. Федоров В М *Докл. РАН* **457** 222 (2014); Fedorov V M *Dokl. Earth Sci.* **457** 869 (2014)
84. Федоров В М *Докл. РАН* **460** 339 (2015); Fedorov V M *Dokl. Earth Sci.* **460** 96 (2015)
85. Федоров В М *Криосфера Земли* (3) 46 (2015)
86. Федоров В М *Ученые записки Росс. гос. гидрометеорологического ун-та* **45** 151 (2016)
87. Федоров В М, Гребеников П В *Геофизические процессы и биосфера* **16** (1) 5 (2017); Fedorov V M, Grebennikov P B *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* **53** 757 (2017)
88. Borisenkov Ye P, Tsvetkov A V, Agaponov S V *Climatic Change* **5** 237 (1983)
89. Borisenkov E P, Tsvetkov A V, Eddy J A J. *Atmosph. Sci.* **42** 933 (1985)
90. Loutre M F et al. *Climate Dynamics* **7** 181 (1992)
91. Bertrand C, Loutre M F, Berger A *Geophys. Res. Lett.* **29** 40 (2002)
92. Федоров В М *Геофизические процессы и биосфера* **14** (1) 5 (2015); Fedorov V M *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* **51** 779 (2015)
93. Федоров В М *Инсоляция Земли и современные изменения климата* (М.: Физматлит, 2018)
94. Костин А А, Федоров В М, <http://www.solar-climate.com/sc/mtd.htm>
95. Giorgini J D et al. *Bull. Am. Astronom. Soc.* **28** 1158 (1996)
96. Solar System Dynamics, <http://ssd.jpl.nasa.gov>
97. Kopp G, Lean J *Geophys. Res. Lett.* **37** L01706 (2011)
98. Bretagnon P *Astron. Astrophys.* **114** 278 (1982)
99. Standish E M *Astron. Astrophys.* **114** 297 (1982)
100. Бакулин П И, Кононович Э В, Мороз В И *Курс общей астрономии* (М.: Наука, 1983)
101. Bertrand C, Van Ypersele J-P *Climatic Change* **43** 387 (1999)
102. Cionco R G, Soon W W-H *Earth-Sci. Rev.* **166** 206 (2017)
103. Roy A E *Orbital Motion* (Bristol: Hilger, 1978); Пер. на русск. яз.: Рой А *Движение по орбитам* (М.: Мир, 1981)
104. Федоров В М *Астрон. вестн.* **50** 233 (2016); Fedorov V M *Solar Syst. Res.* **50** 220 (2016)
105. The Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Cente, PMOD/WRC, <http://www.pmodwrc.ch/>
106. Анищенко В С и др. *УФН* **169** 7 (1999); Anishchenko V S et al. *Phys. Usp.* **42** 7 (1999)
107. Федоров В М *Жизнь Земли* (3) 245 (2017)
108. Федоров В М *Жизнь Земли* (4) 381 (2017)
109. Solar Radiation and Climate of the Earth. Radiation Databases, <http://www.solar-climate.com/en/ensc/bazard.htm>
110. Будыко М И *Изменение климата* (Л.: Гидрометеиздат, 1974); Пер. на англ. яз.: Budyko M I *Climatic Changes* (Washington, DC: American Geophysical Union, 1977)
111. Hansen J et al. *Atmos. Chem. Phys.* **11** 13421 (2011)
112. The Atmosphere s Energy Budget, <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance/page6.php>
113. Trenberth K E, Fasullo J T, Kiehl J *Bull. Am. Meteorolog. Soc.* **3** 311 (2009)
114. Trenberth K E, Fasullo J T *Meteorol. Z.* **18** 369 (2009)
115. Trenberth K E, Fasullo J T *Surv. Geophys.* **33** 413 (2011)
116. Солнечная радиация и климат Земли. Базы данных инсоляции, <http://www.solar-climate.com/sc/bd01.htm>
117. Lean J, Beer J, Bradley R *Geophys. Res. Lett.* **22** 3195 (1995)
118. SOLARISHEPPA. Recommendations for CMIP5 solar forcing data, <http://solarisheppa.geomar.de/cmip5>
119. Palmén E, Newton C W *Atmospheric Circulation Systems. Their Structure and Physical Interpretation* (New York: Academic Press, 1969); Пер. на русск. яз.: Пальмен Э, Ньютон Ч *Циркуляционные системы атмосферы* (Л.: Гидрометеиздат, 1973)
120. Gill A E *Atmosphere-Ocean Dynamic* (New York: Academic Press, 1982); Пер. на русск. яз.: Гилл А *Динамика атмосферы и океана* (М.: Мир, 1986)
121. Pedlosky J *Geophysical Fluid Dynamics* (New York: Springer-Verlag, 1979); Пер. на русск. яз.: Педлоски Дж *Геофизическая гидродинамика* (М.: Мир, 1984)

## Earth insolation variation and its incorporation into physical and mathematical climate models

V.M. Fedorov

Lomonosov Moscow State University,  
Leninskie gory 1, 119991 Moscow, Russian Federation  
E-mail: fedorov.msu@mail.ru

This paper reviews research into long-term variations in the Earth's insolation due to celestial-mechanics processes. Based on an analytical survey of Earth's insolation calculations, general problems encountered in the physical and mathematical modeling of climate are outlined.

**Keywords:** Earth's insolation, orbital motion, variations, climate of the Earth, climate models

PACS numbers: 92.70.Gt, 92.70.Np, 92.70.Qr

Bibliography — 121 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **189** (1) 33–46 (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2017.12.038267>

Received 14 September 2017, revised 21 November 2017

*Physics – Uspekhi* **62** (1) (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2017.12.038267>