В. М. Федоров

Вариации солярного климата как основа реконструкции, анализа и прогноза изменений глобального климата Земли.

Вековая изменчивость солярного климата

Вековые вариации солнечной радиации, связанные с небесно-механическими процессами определяются расчетными методами. При изучении вековых вариаций солнечного потока учитываются подверженные вековым возмущениям такие астрономические элементы как долгота перигелия, эксцентриситет и наклон оси вращения Земли, имеющие, весьма значительные по продолжительности, периоды вариаций (Миланкович, 1939; Шараф, Будникова, 1967, 1968, Berger, 1978 а, 1978 б, 1981).

История изучения вековых вариаций солнечной энергии, определяемых небесно-механическими процессами, отражает развитие исследований относящихся к астрономической теории климата (Хргиан, 1986; Дроздов и др.. 1989; Монин, Шишков, 1978, 2000; Монин, 1982; Imbrie, 1982; Imbrie et al., 1993; Мельников, Смульский, 2009; Смульский, 2013; Вакуленко и др., 2003; Вакуленко и др.. 2007). 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 (Adhémar, 1842). 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 совпадал с положением Земли вблизи афелия). Основополагающая идея Ж. Адемара о том, что Северное и Южное полушарие Земли нагреваются и охлаждаются поочередно была подвержена сомнению немецким естествоиспытателем А. Гумбольдтом и английским астрономом Дж. Гершелем. А. Гумбольдт, например, справедливо отмечал, что средняя температура любого из полушарий определяется не числом часов (суток) теплого и холодного сезона года, а количеством калорий солнечной энергии, которое оно получает за год (Гумбольдт, 1866). Тем не менее, предположение Ж. Адемара о связи возможных климатических изменений с определенными астрономическими явлениями (предварение равноденствий) стало основой для дальнейшего развития представлений об астрономических факторах изменения климата (Миланкович, 1939; Berger, 1988; Имбри, Имбри, 1988; Imbrie, 1982; Imbrie et al., 1993; Большаков. 2003; Большаков, Капица, 2011).

Представления о связи периодов распространения древних оледенений с астрономическими механизмами, получили развитие в работах шотландского ученого Д. Кролля (Croll, 1875; Миланкович, 1939; Шварцбах, 1955). В качестве основополагающего астрономического фактора в представлениях Д. Кроля (наряду с прецессионным циклом) принимается изменчивость эксцентриситета земной орбиты. Используя формулы У. Леверье (Leverrier, 1855, 1856). Д. Кролль 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. Кролль пришел к предполо-

жению 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 Кролль 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. Кроллем 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 (Croll, 1875; Milankovich. 1920; Миланкович, 1939; Марков, 1960; Imbrie, 1982; Imbrie et al., 1993; Большаков, 2003; Большаков, Капица, 2011). Представления Д. Кролля, основу которых составили два астрономических фактора – прецессионный цикл и периодическое изменение формы земной орбиты, были опубликованы в «Философском журнале» в 1864 году.

Вековые колебания поступающей к Земле солнечной радиации в виде математической задачи были рассмотрены в работах Л. Мича (Meech, 1856). Им были получены формулы, связывающие поступающую радиацию (для любой широты) с вековыми колебаниями эксцентриситета, долготы перигелия и наклона эклиптики. Р. Болль (Ball, 1891), 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 Е. Кельвероэлла (Culverwell, 1894, 1895), Р. Хэргривса (Hargreaves, 1896), Н. Экхольма (Ekholm, 1901), но математическая часть задачи наиболее детально исследована в работах М. Миланковича (Croll, 1875; Milankovich, 1920; Миланкович, 1939; Шварцбах, 1955; Марков, 1960; Монин, Шишков, 1979; Монин, 1982; Большаков, Капица, 2011).

Таким образом, к концу XIX века было известно, что распределение инсоляции по поверхности зависит от трех орбитальных характеристик: эксцентриситета орбиты, наклона оси вращения и положения точек равноденствия в ее прецессионном цикле. В начале XX века появились работы немецкого математика Л. Пильгрима, в которых были изложены результаты новых расчетов этих астрономических характеристик («Опыт числовой разработки проблемы ледниковых периодов») за период времени в 1010 тысячелетий до 1850 г. н.э. (Pilgrim, 1904). В связи с этим, расчет количества поступающей солнечной энергии стал принципиально возможным.

Расчеты вековых изменений астрономических элементов Л. Пильгрима (за 600 000 лет), были пересчитаны В. Мишковичем (директором астрономической обсерватории в Белграде). Эти данные стали основой для расчетов М. Миланковичем вековых вариаций солнечной инсоляции. В своих расчетах В. Мишкович исходил из расчетов орбитальных характеристик и масс планет, выполненных У. Леверье. Л. Пильгрим использовал данные Ж. Стоквелла (Stockwell, 1872) уступающие по точности расчетам У. Леверье. Точность в расчетах В. Мишковича составляла: для эксцентриситета – до 4-х десятичных знаков, для наклона эклиптики – до секунд, для долготы перигелия – до минут для периода времени, по меньшей мере, 100 000 лет до и после нашей эпохи (начало 1800 года).

Следует, однако, отметить, что в то время С. Ньюкомбом (Newcomb, 1895) 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 расчетах ими не воспользовался. Расчеты У. Лаверье основывались на вековых возмущениях рассчитанных Ж. Лагранжем (Lagrange, 1781). 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 Ж. Лагранж мог принять во внимание только шесть. Уран был открыт (Дж. Гершелем в 1781 году) во время выполнения расчетов Ж. Лагранжем и элементы этой новой планеты не были определены даже приблизительно. Не было известно ничего и о ее спутниках. Нептун будет открыт (на основе расчетов У. Лаверье, связанных с возмущением в орбитальном движении Урана) только в 1846 году. Марс считался не имеющим спутников. Поэтому для определения масс двух планет (Марс, Уран) Ж. Лагранж мог опираться на грубо приближенные данные. Тем не менее, ему удалось, хотя и приблизительно, определить границы, между которыми могут изменяться эксцентриситеты орбит планет, наклоны плоскостей их орбит и наклон эклиптики. Принципиально важным в контексте данного обзора представляется, полученный Ж. Лагранжем, вывод о том, что большие полуоси орбит не подвергаются вековым изменениям, который позднее был включен П. Лапласом в теорему устойчивости Солнечной системы (Laplace, 1825; Арнольд, 1963; Дубошин, 1975, 1978; Лаплас. 1982).

М. Миланковичем были определены климатические эффекты вековых вариаций трех астрономических элементов: наклона эклиптики (ε), эксцентриситета (e) и долготы перигелия (П). 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 (в отсутствии атмосферы). При ε = 0, когда оба полюса в течение всего года остаются неосвещенными, широтные контрасты максимальны (Миланкович, 1939). 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 (Миланкович, 1939).

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 (П). Вследствие изменчивости обоих элементов e и П разность в приходе радиации между летним и зимним сезоном (полугодиями) является функцией времени. Так долгота перигелия примерно 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 в 92 000 лет (со значительно меньшей амплитудой), оставаясь заключенной между 0 и 0,0677. Изменения разности в продолжительности летнего и зимнего сезонов зависит от обоих факторов, но влияние первого из них значительно сильнее. Вследствие этого величина разности (между приходом в летнее и зимнее вре-

мя) колеблется около некоторого среднего значения с периодом в 21 000 лет, а изменчивость амплитуды всех этих колебаний характеризуется периодом около 46 000 лет (Миланкович, 1939).

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°08), выражается следующим образом. Разность продолжительности летнего и зимнего полугодий равняется 0 только при долготе перигелия равной 0° (перигелий совпадает с точкой весеннего равноденствия) и равной 180° (перигелий совпадает с точкой осеннего равноденствия). При этом 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 максимальные (рис. 1).

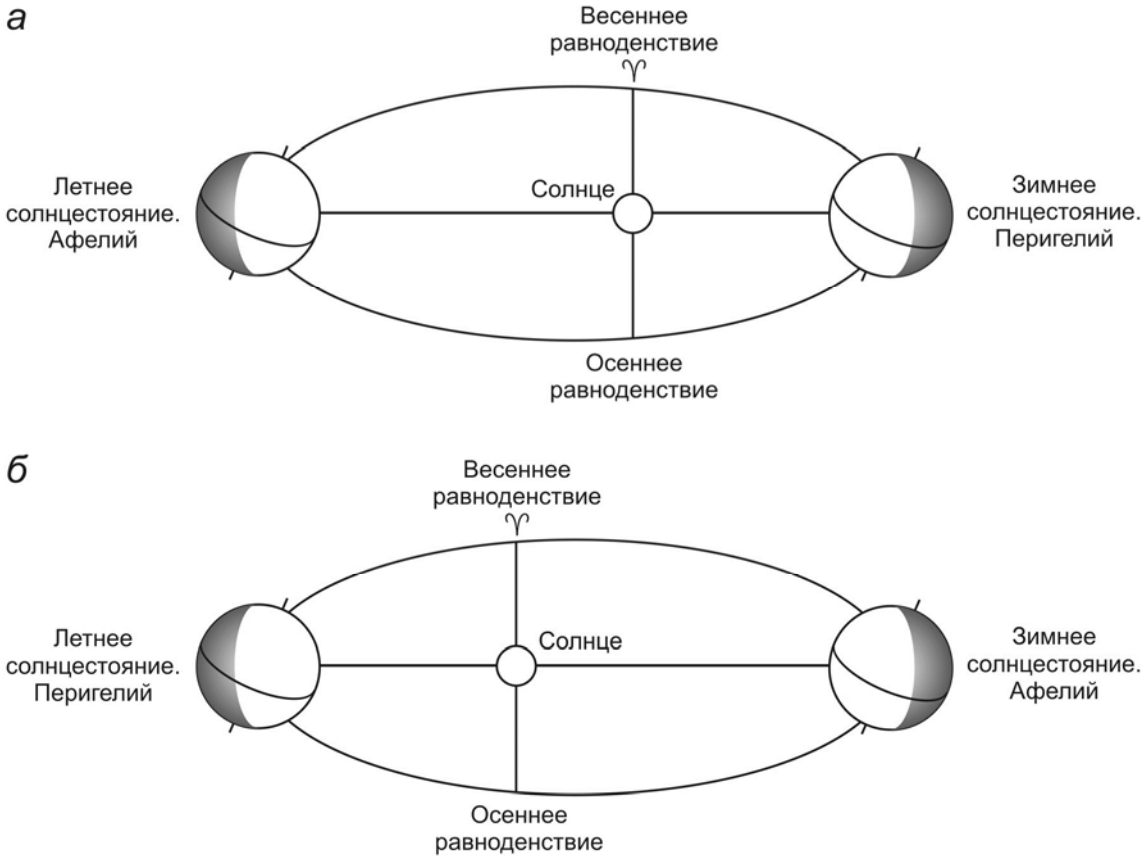

Рис. 1. Конфигурации Земли и Солнца: а – при соединении перигелия с точкой зимнего солнцестояния (долгота перигелия 90°); б – при соединении перигелия с точкой летнего солнцестояния (долгота перигелия 270°).

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° (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. 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 это короткое лето, равно тому количеству, которое получает северное полушарие за свое 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° (перигелий совпадает с точкой осеннего равноденствия) летнее и зимнее полугодие имеют равную продолжительность в обоих 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 максимальные. При долготе перигелия равной 270° (перигелий совпадает с точкой летнего солнцестояния) продолжительность летнего полугодия в северном полушарии минимальная, и противоположность между летним и зимним сезонами (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 северном полушарии выражены наиболее контрастно, а в южном они сглаживаются. При положении перигелия в точке летнего солнцестояния ситуация становится обратной. В этом случае сезонные контрасты максимально выражены в южном полушарии и сглаживаются в северном полушарии (Миланкович, 1939; Монин, Шишков, 1979; Imbrie, 1982; Имбри, Имбри, 1988; Большаков, 2003).

На основе расчетов вековых изменений астрономических элементов (выполненных В. Мишковичем) М. Миланковичем были рассчитаны значения инсоляции для 65-ти градусной параллели Северного полушария за последние 650 000 лет. Полученный Миланковичем график инсоляции (в значениях широтных эквивалентов) впервые был опубликован в 1924 году в работе В. Кёппена и А. Вегенера (Köppen, Wegener, 1924) «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.).

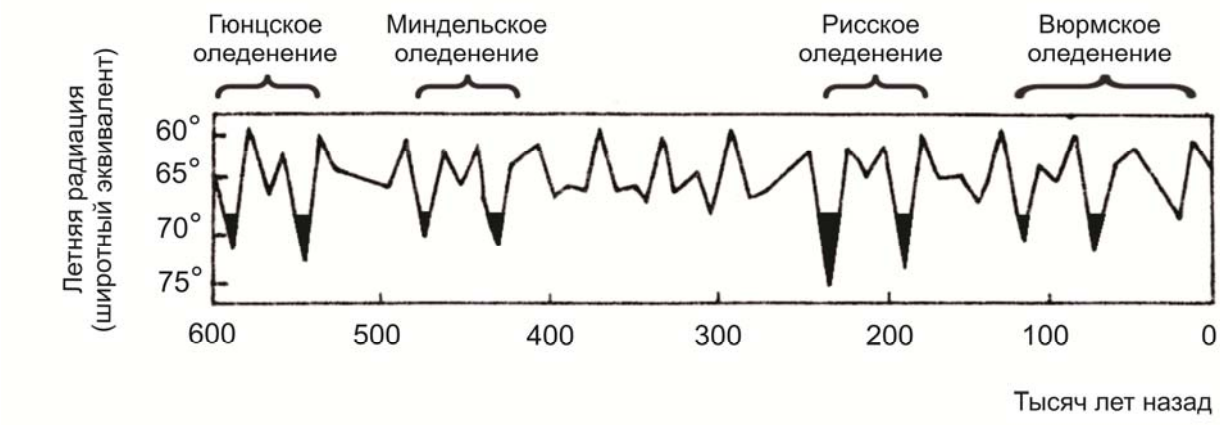

Рис. 2 Амплитуды вековых отклонений летних сумм радиации для 65° градусов с.ш. в значениях широтных эквивалентов (Миланкович, 1939).

Вместо расчета сумм тепла за летнее и зимнее полугодия М. Миланкович использовал калорические полугодия. Калорические полугодия определяются как полугодия одинаковой продолжительности $\left(\frac{T_o}{2}\right)$, когда на данной широте любое значение суточной инсоляции в летнее полугодие, больше любого значения суточной инсоляции в зимнее полугодие. Продолжительность тропического года считалась постоянной. При расчетах использовались канонические единицы (величина солнечной постоянной равная при расчетах 2 кал / мин · см^2 соответствовала 1 канонической единице, продолжительность тропического года 100 000 канонических единиц). В дальнейшем М. Миланковичем были рассчитаны вариации инсоляции для восьми широтных поясов (располагающихся между 5° и 75° северной широты). Основные результаты его исследований изложены в работе «Математическая климатология и астрономическая теория изменения климата» (Миланкович, 1939).

Расчеты, произведенные М. Миланковичем, в дальнейшем выполнялись с уточнениями рядом авторов. Эти расчеты основывались на новых решениях теории вековых возмущений полученных для всей Солнечной системы в 1950 году Д. Брауэром и А. Ван Вуркомом (Brouwer, Van Woerkom, 1950). В расчетах использовались последние данные о массах и движении планет, учитывались эффекты второго порядка, вызванные, например, долгопериодическими вариациями в движении Юпитера и Сатурна.

Детальные расчеты провели советские астрономы Ш.Г. Шараф и Н.А. Будникова (Шараф, Будникова,1967, 1968, 1969). 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 оси вращения происходили с периодами около 41 и 200 тыс. лет и определялись пределами от 22,068° до 24,568°. Отклонения величин e · sin П от его значения в 1950 году колебались в пределах от +0,03 до -0,07 со средним периодом около 21 тыс. лет. Вариации эквивалентных широт определя-

лись пределами 58 – 79° (довольно значительно) 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.

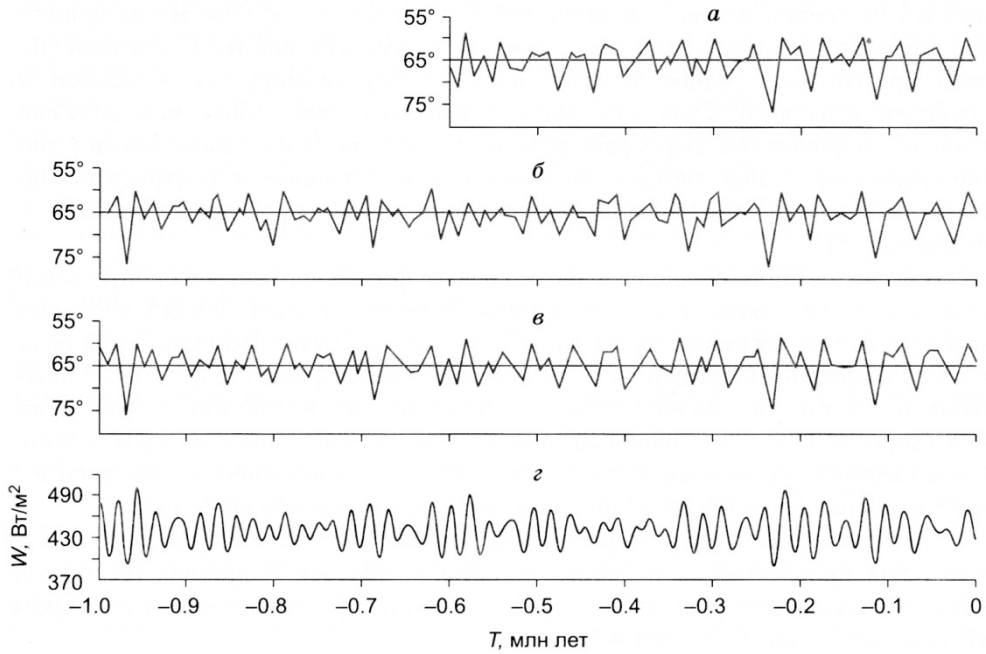

Рис. 3 Изменение инсоляции за летнее калорическое полугодие для широты 65° северного полушария по данным разных исследователей (Мельников, Смульский, 2009): а – (Миланкович, 1939); б – (Brouwer, Van Woerkom, 1950); в – (Шараф, Будникова, 1969); г – (Berger, Loutre, 1991). По оси абсцисс отложено время в тысячелетиях от 1950 г.; по оси ординат: а, б, в – инсоляция в эквивалентных широтах в течение летнего полугодия, г – среднемесячная инсоляция в июле (Вт/м^2).

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 с шагами по времени в 5 тыс. лет и по широте в 10° (Монин, 1982; Монин, Шишков, 2000).

Суммарная за калорические полугодия радиация рассчитывалась на основе соотношения:

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

где I_0 солнечная постоянная (равная 2 кал / мин · см^2), T_0– продолжительность тропического года (принимается постоянной), S – функция, описывающая распределение годовой инсоляции по меридиану, φ - географическая широта, П – долгота перигелия, e – эксцентриситет, ε - наклон эклиптики. Из формулы (1) видно, что величины $Q_{s,w}$ зависят от наклона оси ε и от элементов земной орбиты r_0 (через l_0 и T_0), e и П (Монин, 1982). Расчеты с использованием формулы (1) показали, что аномалии инсоляции за калорические полугодия максимальны в летних полярных областях, где они достигают значений $\pm$ 250 МДж/м^2, и в общем убывают в сторону зимних полярных районов. Отмечается, что изменение аномалий имеет квазипериодический характер с периодом около 40 000 лет (Vulis, Monin, 1979; Монин, 1982; Монин, Шишков, 2000).

Так же повторные расчеты вековых изменений элементов земной орбиты и инсоляции были выполнены А. Вернекаром (Vernekar, 1972), П. Бретаньоном (Bretagnon, 1974). Позднее А. Берже (Berger, 1978 a) 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). 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 (Шараф, Будникова, 1969).

Следует отметить, что при приближенном аналитическом решении задач связанных с орбитальным движением вводятся упрощения физического и математического характера (например, взаимодействующие тела рассматриваются как материальные точки или тела определенной формы и т.д.). В связи с этим возможные ошибки при расчетах на большие периоды возрастают (поэтому М. Миланкович полагал, что надежные результаты могут быть получены на период 600 тыс. лет). Ш.Г. Шараф и Н.А. Будникова, уточнили исходные данные и прецессионные решения, а также рассчитали инсоляцию на интервал 30 млн лет. А. Берже и М. Лутр выполнили расчеты для интервала в 5 и 3 млн лет (Berger, Loutre 1991, 1992), Т. Кинн с коллегами рассчитали вариацию инсоляции на 3 млн лет (Quinn et al., 1991). Ж. Ласкар и его коллеги усовершенствовали теорию вековых возмущений и выполнили расчеты 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 (Laskar, 1988; Laskar et al., 1993, 2004).

В целом, с историей развития астрономической теории климата связано получение серии расчетных значений вековых 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 различаются в связи с различиями в начальных условиях и в способах расчетов (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 учета влияния атмосферы, океана и других факторов на формирование глобального климата оказались неэффективными в отношении поисков причин его изменений (Шварцбах. 1955; Kukla, 1975). Осложняет объяснение развития оледенений вековыми вариациями солнечной радиации ряд иных явлений, например, метахронность оледенений (Колосов. 1947; Марков, 1960), отсутствие оледенений в течение длительных геологических периодов (например, меловой). Таким образом, в масштабах геологического времени иные (кроме солярного климата) климатообразующие факторы могут становиться решающими, например, изменение скорости вращения Земли, движение материков, изменение рельефа и очертаний материков и океанов, их площадей, изменение траекторий океанических течений, состава атмосферы и характера атмосферной циркуляции, вулканическая активность и другие.

Вариации солярного климата представляются приоритетным фактором климатообразования при анализе климатических изменений на непродолжительных временных интервалах.

В качестве механизмов, усиливающих фактор изменчивости солярного климата в его воздействии на глобальный климат, также рассматриваются и хаотические движения, например, оси вращения (Laskar, 1990, 2004; Laskar, Robutel, 1993; Пригожин, Стенгерс, 2003; Резонансы в небесной механике, 2006). В последние годы прошлого века появились объяснения глобальных климатических изменений (возникновения ледниковых и межледниковых эпох) в геологическом прошлом нашей планеты основу которых составляет эффект стохастического резонанса – отклика бистабильной или метастабильной нелинейной системы на слабый периодический сигнал при шумовом воздействии определенной мощности (Berger, 1981; Nicolis, 1981, 1982, 1993; Nicolis, Prigogine, 1989; Baker, Gollub, 1990; Анищенко и др., 1999, 2006). Однако, эти идеи еще в полной мере, не приняты геофизиками и палеоклиматологами.

В заключение напомним, что временной диапазон исследований, относящихся к астрономической теории климата, определяется исследованием вековых 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. 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» (Миланкович, 1939). Выполненные М. Миланковичем расчеты показывают, что «количества радиации, получаемые во время астрономической весны и лета, одинаковы так же как и количества радиации, получаемые во время осени и зимы». Так же из расчетов следует, что «любая широта южного полушария получает за свое летнее полугодие столько же радиации, сколько та же широта северного полушария в течение своего летнего полугодия; то же относится и к зимним полугодиям» (Миланкович, 1939). При исследовании вековых вариаций принимается постоянство как большой полуоси земной орбиты (в соответствии с теоремой устойчивости Лапласа) так и продолжительность времени обращения земли вокруг оси (по третьему закону Кеплера) (Миланкович, 1939). Следует также напомнить, что законы Кеплера справедливы для невозмущенного движения.

Все расчеты приходящей солнечной радиации, о которых речь шла выше объединяет одно: они проводились для интервалов большой временной продолжительности. Поэтому в них не учитываются периодические возмущения и связанные с ними вариации орбитального движения Земли и наклона оси ее вращения. Как верно отмечалось Ж. Лагранжем, П. Лапласом и М. Миланковичем, периодические возмущения являются несущественными, по сравнению с вековыми возмущениями при рассмотрении солярного климата Земли в масштабах геологического времени. Однако, для исследования изменения солярного климата в интервалах малой временной размерности (в современную эпоху) необходимо учитывать вариации приходящей солнечной радиации с учетом периодических возмущений орбитального движения Земли и наклона оси ее вращения. **Именно для интервала времени малой продолжительности (десятки – сотни лет), вариации солярного климата Земли могут иметь решающее значение среди прочих причин из-**

менения глобального климата. В интервалах еще меньшей временной размерности исследуются изменения погодных условий (часы – сутки – месяцы).

Периодические возмущения

Временная размерность проводимых нами исследований позволяет учитывать малые вариации солнечной радиации, связанные с небесно-механическими процессами – периодическими возмущениями орбитального движения Земли (Федоров. 2012, 2013, 2014). Следует отметить, что теорема устойчивости Лапласа справедлива только при отсутствии соизмеримостей в средних движениях больших планет (Арнольд, 1963; Дубошин, 1975, 1978). Однако, в средних движениях Земли и ближайших планет Марса, Венеры, а также Юпитера (Гребеников, Рябов, 1978) отмечаются соизмеримости (2/1, 3/5, 12/1 соответственно) или явление орбитального резонанса. В связи с этим постоянство большой полуоси земной орбиты и продолжительность периода ее обращения вокруг Солнца в реальности точно не соблюдается. С периодическими изменениями величины большой полуоси земной орбиты, продолжительности периода ее обращения вокруг Солнца и наклона оси вращения, вследствие орбитального резонанса, связаны периодические малые вариации солярного климата Земли (Федоров, 2012, 2013, 2014).

Как вытекает из краткого исторического обзора, необходимость новых расчетов и нового подхода к поискам связи вариаций солнечной радиации с изменениями глобального климата определяется, по крайней мере, двумя основными причинами. Во-первых, это связано с постоянным обновлением исходных для расчетов данных учитывающие изменения в теории возмущений. В настоящее время такие данные представлены, например, в астрономических эфемеридах (JPL Planetary and Lunar Ephemerides). Во-вторых, в связи с тем, что отклик климатической системы Земли во временном диапазоне вековых вариаций однозначно не определен.

Из этого следует необходимость нового подхода в поисках решения проблемы связи климатических изменений с вариациями солнечной радиации – расчетов солнечной радиации на основе новых исходных данных в периодическом диапазоне вариаций (т.е. в ином временном формате, с иным временным разрешением, в иной временной размерности).

Предметом наших исследований являются поиски связи изменений климатической системы Земли и ее компонентов с вариациями солнечной радиации (с учетом периодических возмущений и малых вариаций солярного климата) на временном интервале малой размерности.

Исследования вариаций солярного климата Земли в периодическом диапазоне представляются перспективными по ряду других причин:

1) Эта временная размерность обеспечена астрономическими данными, обладающими наибольшей в настоящее время точностью. Наши расчеты основаны на астрономических данных о движении небесных тел (JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE-405/406), рассчитанных для интервала от 3000 до н.э. до 3000 н.э.
2) Этот временной диапазон, наиболее обеспечен подробной климатологической информацией, что позволяет проводить детальные исследования связи вариаций климатических элементов и изменчивости поступающей к Земле солнечной радиации (определение чувствительности климатической системы к вариациям солнечной радиации).

3) Расчеты поступающей радиации относятся к реальным по продолжительности астрономическим сезонам, полугодиям и тропическим годам (а не к условным калорическим полугодиям), что позволяет получить более четкую и реальную картину пространственной и временной изменчивости солярного климата Земли.
4) Выбранный временной масштаб удобен и для сравнения вариаций разной физической природы (небесно-механическими процессами и активностью Солнца) и создает возможность для получения полной физической картины вариаций интенсивности поступающей к Земле солнечной радиации.

Расчеты приходящей солнечной радиации в диапазоне периодических возмущений были начаты в Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова (Borisenkov, Tsvetkov, Agaponov, 1983; Borisenkov, Tsvetkov, Eddy , 1985). При этом использовались астрономические эфемериды С. Ньюкомба и (с 1987 года) эфемериды Института прикладной астрономии Российской Академии Наук. Однако, дальнейшего развития эти исследования не получили.

Результаты новых расчетов солнечной радиации в периодическом диапазоне представлены в соответствующем разделе сайта.

Литература

1. Анищенко В.С., Нейман А.Б., Мосс Ф., Шиманский – Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения порядка // Успехи физических наук, 1999. – т. 169. - № 1. – с. 7–38.
2. Анищенко В.С., Ануфриева М.В., Вадивасова Т.Е. Стохастический резонанс в бистабильной системе под воздействием хаотического сигнала // Письма в ЖТФ, 2006. – т. 32(20). – с. 12 – 17.
3. Арнольд В.И. Малые знаменатели и проблема устойчивости в классической и небесной механике // Успехи матем. наук., 1963. – Т. 18. – № 6. – С. 91 – 192.
4. Большаков В.А. Новая концепция орбитальной теории климата. – М.: 2003. – 256 с.
5. Большаков В.А., Капица А.П. Уроки развития орбитальной теории палеоклимата // Вестник РАН, 2011. – т. 81. – № 7. – с. 603 – 612.
6. Вакуленко Н.В., Монин А.С., Сонечкин Д.М. Об определяющей роли амплитудной модуляции прецессионных циклов в чередовании ледниковых эпох позднего плейстоцена // Доклады РАН, 2003. – т. 391. - № 6. – с. 817 – 820.
7. Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Монин А.С., Сонечкин Д.М. Синхронность ледниковых циклов позднего плейстоцена с ходом инсоляции на экваторе и ее перераспределение между высокими и низкими широтами // Известия РАН. – серия географическая, 2007. – № 5. – с. 45 – 57.
8. Гребеников Е.А., Рябов Ю.А. Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. – М.: Наука, 1978. – 128 с.
9. Гумбольдт А. Космос (опыт физического мироописания). – М.: Братья Салаевы, 1866. – 408 с.
10. Дроздов О.А., Васильев Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный В.П. Климатология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 568 с.
11. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. – М.: Наука, 1975. – 800 с.
12. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Аналитические и качественные методы. – М.: Наука, 1978. – 456 с.
13. Имбри Д., Имбри К.П. Тайны ледниковых эпох. – М.: Прогресс, 1988. – 264 с.
14. Колосов Д.М. Проблемы древнего оледенения Северо-Востока СССР. – М. – Л.: Главсевморпуть, 1947. – 176 с.
15. Лаплас П.С. Изложение системы мира. – Л.: Наука, 1982. – 375.
16. Марков К.К. Палеогеография. – М.: МГУ, 1960. – 268 с.
17. Мельников В.П., Смульский И.И. Астрономическая теория ледниковых периодов: Новые приближения. Решенные и нерешенные проблемы. – Новосибирск.: ГЕО, 2009. – 98 с.
18. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. – М.–Л.: ГОНТИ, 1939. – 208 с.

19. Монин А.С., Шишков Ю.А. История климата. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 408 с.

20. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физ. наук. 2000. – т. 170. – № 4. – с. 419 – 445.

21. Монин А.С. Введение в теорию климата. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 246 с.

22. Пригожин И., Стенгерс И. Квант, хаос, время. К решению парадокса времени. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 240 с.

23. Резонансы в небесной механике. – Москва – Ижевск.: Институт компьютерных исследований, 2006. – 316 с.

24. Смульский И.И. Анализ уроков развития астрономической теории палеоклимата // Вестник РАН, 2013. – т. 83. - № 1. – с. 40 – 44.

25. Федоров В.М. Теоретический расчет межгодовой изменчивости солнечной постоянной // Астрономический вестник, 2012. – т. 46. – № 2. – с. 184 – 189.

26. Федоров В.М. Межгодовые вариации продолжительности тропического года // Доклады РАН, 2013. – т. 451. – № 1. – с. 95 – 97.

27. Федоров В.М. Периодические возмущения и малые вариации солярного климата Земли // Доклады РАН, 2014. – т. 457. – № 2. – с. 222 – 225.

28. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. – М.: МГУ, 1986. – 328 с.

29. 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.

30. Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Колебания солнечного облучения Земли, вызванные вековыми изменениями элементов земной орбиты // ДАН СССР, 1968. – т. 182. – № 2. – с. 291 – 293.

31. Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. О вековых изменениях элементов орбиты Земли, влияющих на климаты геологического прошлого // Бюллетень Института теоретической астрономии АН СССР, 1967. – т. 11. – № 4 (127). – с. 231 – 261.

32. Шварцбах М. Климаты прошлого. – М.: Иностранная литература, 1955. – 284 с.

33. Adhémar J.A. Revolutions de la mer: déluges périodiques. – Paris.: Carilian-Goeury et V. Dalmont, 1842. – 184 p.

34. Baker. G., Gollub J. Chaotic dynamics: Cambridge University Press. – Cambridge, 1990. – 182 p.

35. Ball. R The cause of an Ice Age. – New York, D. Appleton and company, 1891.

36. Berger A. Long-term variation of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements // Quat. Res., 1978 a. – V. 9. – Pp. 139 – 167.

37. Berger A. Long-term variation insolation and Quaternary climatic change // J. Atmos. Sci., 1978 в. – V. 35. – Pp. 2362 – 2367.

38. Berger A. (Ed), Climatic variations and variability – facts and theories. – Dordrecht. – Reidel, 1981. – 795 p.

39. Berger A. Milankovitch theory and climate // Revs. of Geophysics. 1988. – V. 26. – Pp. 624 – 657.

40. Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years? // Quatern. Sci. Rev., 1991. – V. 10. – Pp. 297 – 317.

41. Berger A., Loutre M.F. Astronomical solutions for paleoclimate studies over the last 3 million years // Earth Planet. Sci. Lett., 1992. – V. 111. – Pp. 369 – 382.

42. 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. – Pp. 237-244.

43. Borisenkov E. P., Tsvetkov A,V., Eddy J.A. Combined Effects of Earth Orbit Perturbations and Solar Activity оп Terrestrial Insolation. Part 1: Sample Days and Annual Mean Values // Journal of the atmospheric sciences, 1985. – V. 42. – № 9. – Pp. 933 – 940.

44. Bretagnon P. Termes à longues périodes dans le Système Solaire // Astron. Astrophys., 1974. V. 30. – Pp. 141 – 154.

45. Brouwer D., Van Woerkom A.J.J. The secular variation of the orbital elements of the principal planets // Astronomical Papers, 1950. – V. 13. – Pp. 81 – 107.

46. Croll J. Climate and time in their geological relations: a theory of secular changes of the Earth`s climate. – London.: Edward Stanford, 1875. – 577 p.

47. Culverwell E. P. The astronomical theory of the ice age // Nature LII 53, 1995.

48. Culverwell E. P. A criticism of the astronomical theory of the ice age //Nature LI 33 – 35, 1894.

49. Ekholm N. G. On the Variations of the Climate of the Geological and Historical Past and Their Causes // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1901. – V. 27. Pp. 1–61.

50. Hargreaves R. Distribution of solar radiation on the surface of the Earth and its dependence on astronomical elements // Trans. Cambridge Philos. Soc., 1896. – 16. 58.

51. Imbrie J. Astronomical Theory of the Pleistocene ice ages brief historical review // Icarus, 1982. – V. 50. – Pp. 408 – 422.

52. 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., 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 // Paleooceanology, 1993. – V. 8. – Pp. 699 – 735.

53. Köppen W., Wegener A. Die Klimate der geologischen Vorzeit. – Berlin.: Gebr. Bornetraeger, 1924. – 256 p.

54. Kukla G. Missing link between Milankovitch and climate // Nature. 1975. – V. 253. – Pp. 600 – 603.

55. Lagrange J – L. Theorie des variations seculaires des elements des planets. Berlin, Decker, 1781.

56. Laplace P. S. Traite de Mecanique Celeste. Paris, Bachelier libraire, 1825.

57. Laskar J The chaotic behavior of the solar system: A numerical estimate of the size of the chaotic zones // Icarus, 1990. – V. 88. – Pp. 266 – 291.

58. Laskar J. Secular evolution of the Solar System over 10 million years // Astron. Astrophys, 1988. – V. 198. – Pp. 341 – 362.

59. Laskar J., Robutel P. The chaotic obliquity of the planet // Nature, 1993. – V. 361. – Pp. 608 – 612.

60. 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. – Pp. 522 – 533.

61. Laskar J., Correia A.C.M., Gastineau M. et al. Long-term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars // Icarus, 2004. – V. 170. – Pp. 343 – 364.

62. Leverrier U.J.J. Recherches astronomiques. Annales de l'Observatoire imperial de Paris. V. I. – 1855. V. II – 1856.

63. Meech L. W. On the Relative Intensity of the Heat and Light of the Sun Upon Different Latitudes of the Earth. Washington, Smithsonian Institution, 1856. – V. IX. – 58 p.

64. Milankovich M. Theorie mathematique des phenomenes thermique produits par la radiation solaire. – Paris, Gauthier-Villars, 1920. – 399 p.

65. Newcomb S. The elements of the four inner planets and the fundamental constants of astronomy. – Washington. Govern. print. office, 1895. – 202 p.

66. Nicolis C. Solar variability and stochastic effects on climate // Sol. Phys., 1981. – V. 74. – Pp. 473 – 478.

67. Nicolis C. Stochastic aspects of climatic transitions-response to a periodic forcing // Tellus, 1982. – V. 34. – Pp. 1– 9.

68. Nicolis C. Long-Term Climatic Transitions and Stochastic Resonance // J. Stat. Phys., 1993. – V. 70. – Pp. 3 – 14.

69. Nicolis G., Prigogine I. Exploring complexity. – New York, Freeman. – 1989. – 313 p.

70. Pilgrim L. Versuch einer rechnerische Behandlung der Eiszeit. Jahreshefte d. Vereins f. vaterllandsche Naturkunde im Wurtemberg, V. 60, 1904.

71. Quinn T., Tremaine S., Duncan M. A three million year integration of the Earth`s orbit // Astronomical J., 1991. – V. 101, – Pp. 2287 – 2305.

72. 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.

73. Vernekar A. Long-period global variations of incoming solar radiation // Series: Meteorological Monographs. American Meteorological Society, 1972. – V. 12. – № 34. – 128 p.

74. Vulis, 1., Monin A.S. A contribution to the astronomical theory of variations of the climate of the Earth / Izv. Acad. Sci. USSR, Atmos. Ocean. Phys., 1979. – № 15. – Pp. 3 –11.